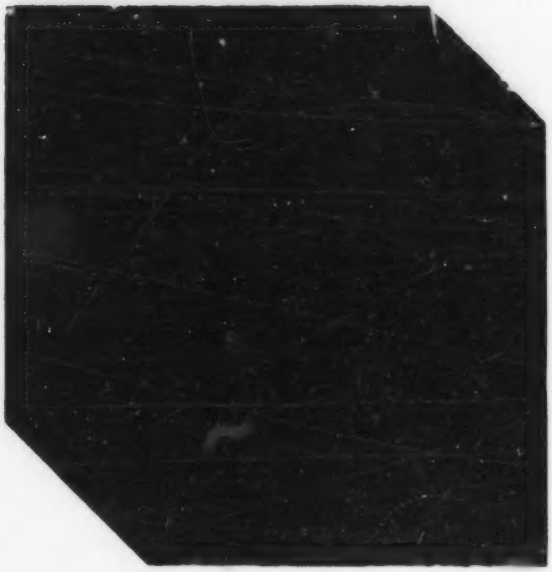
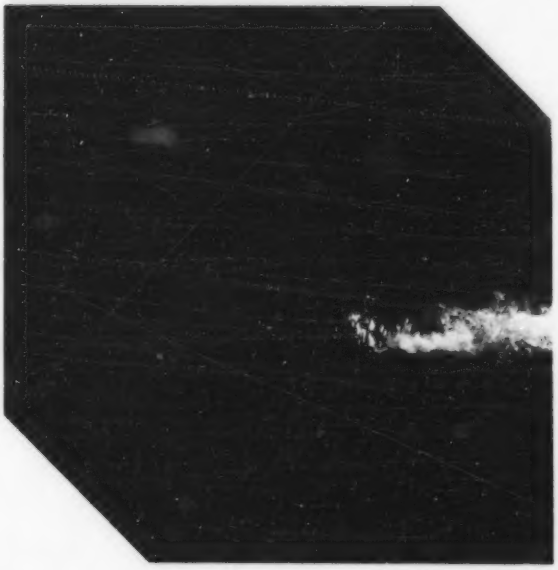
QUE
ENER
RES

L'énergie:

Miser sur l'inépuisable





LEGISLATIVE LIBRARY
RECEIVED

Énergie
et Ressources
Québec

101-06160/

L'énergie:

Miser sur l'inépuisable

Ce document a été préparé par monsieur Pierre Sormany sous l'autorité de la Direction des énergies nouvelles du gouvernement du Québec.

Coordination de la production: Nadine Girardville

Dépôt légal, le trimestre 1980
Bibliothèque nationale du Québec

ISBN 2-551-03781-6

© Ministère de l'Énergie et des Ressources
du Québec 1980

Table des matières

Introduction 6
Une énergie surabondante à redécouvrir

Première partie 10
L'usage direct du rayonnement solaire

Chapitre 1 12
L'effet de serre et le chauffage à basse température

Chapitre 2 18
La concentration de l'énergie solaire et la production d'électricité

Chapitre 3 20
L'effet photovoltaïque

Chapitre 4 22
L'utilisation directe du soleil: un bilan prospectif

Deuxième partie 24
Le pétrole vert

Chapitre 5 27
Du bois à brûler

Chapitre 6 31
La biomasse à transformer

Chapitre 7 34
La photosynthèse non-végétale et la production intensive de combustibles

Troisième partie 36
Les sources indirectes d'énergie solaire

Chapitre 8 38
La maîtrise du vent

Chapitre 9 41
L'énergie des océans

Quatrième partie 43
Les autres sources d'énergie inépuisable

Chapitre 10 44
Cette chaleur sous nos pieds

Chapitre 11 46
L'asservissement des marées

Conclusion 47
... Beaucoup plus qu'une question de folklore

Introduction

Une énergie surabondante à redécouvrir

L'énergie au Québec

Le Québécois est parmi les consommateurs d'énergie les plus voraces au monde. Cela tient certes autant à nos hivers rigoureux et aux grandes distances qui séparent nos villes qu'à notre mode de vie énergivore. Nous consommons chacun, vieillards et enfants compris, l'équivalent de 61 barils de pétrole par année. C'est une quantité neuf fois plus élevée que la moyenne mondiale, et jusqu'à 60 fois plus forte que la consommation moyenne de certains pays du Tiers-monde. Il n'est pas étonnant que la crise de l'énergie et le renchérissement des prix qui l'a suivie en 1973 et 1974 nous aient fait réfléchir sur la fragilité de notre situation.

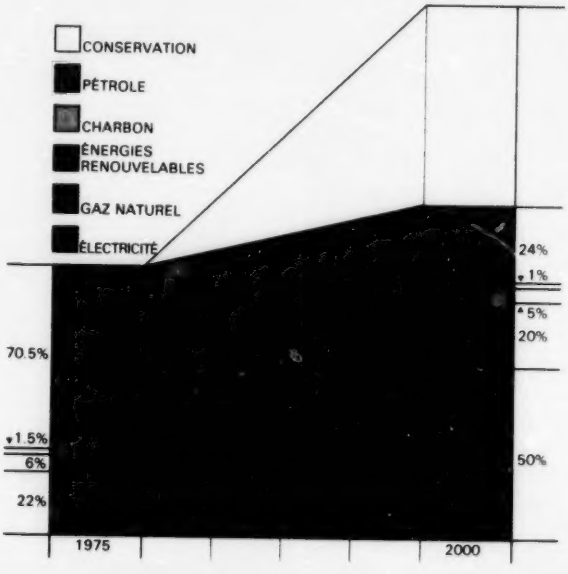
Nous aient fait réfléchir, certes... mais sans parvenir toutefois à modifier radicalement nos habitudes. Bien sûr, la croissance de notre consommation n'est plus que de 2,7 pour cent par année depuis 1972, alors qu'elle atteignait 5,4 pour cent au cours des 15 années précédentes. Le ralentissement économique peut expliquer en bonne partie cette apparente «modération». Et même si nous maintenions ce rythme modeste, notre demande d'énergie doublerait d'ici la fin du siècle!

Certains se rassureront en constatant que même après l'entrée en service des centrales de la Baie James, seulement la moitié de nos réserves hydrauliques seront en exploitation (voire 40 pour cent, si on inclut le potentiel des petites rivières de 100 MW ou moins, peu rentables à exploiter présentement). Mais c'est une bien maigre consolation: malgré le développement intensif de cette ressource, l'électricité ne fournit aujourd'hui que 22 pour cent de notre menu énergétique. Pour le reste, nous dépendons totalement de l'étranger. Et surtout du pétrole, qui s'épuise plus rapidement que l'on ne découvre de nouveaux gisements. Que ferons-nous après 1990 ou 1995, lorsque nos fournisseurs actuels cesseront de nous approvisionner?

Des mesures d'économie d'énergie peuvent retarder le cul-de-sac. Les processus de production et de transport de l'énergie ne sont pas toujours efficaces, et au niveau des usagers, près de la moitié de l'énergie consommée est dissipée en pure perte. C'est là notre principale ressource «de rechange». Mais les mesures d'épargne d'énergie ne peuvent être mises en place que progressivement, et si elles peuvent à la limite freiner toute croissance de notre consommation d'ici la fin du siècle, elles ne solutionnent pas le problème du remplacement progressif du pétrole. Les objectifs de l'État sont toutefois plus modérés, et visent à restreindre la croissance entre 1 et 1.2 pour cent par année.

La solution adoptée par de nombreux pays ayant de faibles ressources énergétiques repose sur le développement intensif de l'électro-nucléaire. Le Québec, toutefois, grâce à ses ressources hydro-électriques, peut se permettre de retarder l'introduction du nucléaire et chercher d'autres solutions.

Au rythme actuel, les besoins du Québec en énergie doubleraient d'ici la fin du siècle. Des mesures radicales d'économie d'énergie, un doublement de notre production d'électricité et une augmentation de la part accordée au gaz naturel ne suffiront pas à combler le «déficit pétrolier» sans un effort de développement de nouvelles ressources renouvelables.



La presque totalité du rayonnement solaire est perdue soit par réflexion directe sur l'atmosphère ou sur le sol, soit par absorption puis rayonnement dans l'air et dans l'eau, soit dans le processus de l'évaporation et des précipitations. La proportion de cette énergie recueillie par les serres, les collecteurs solaires, les éoliennes et les barrages hydro-électriques demeure infime. La majeure partie de notre énergie vient donc de la photosynthèse qui n'utilise pourtant qu'un demi-millième du rayonnement solaire. Cela suffit pourtant à notre alimentation (énergie musculaire), à la combustion directe, et à la constitution de réserves géologiques d'hydrocarbures. C'est présentement surtout de ces réserves que nous dépendons.

Mourir de soif... en pleine mer

Pourtant, au moment où ces problèmes assombrissent notre avenir, nous baignons littéralement dans un océan d'énergie. La terre et son enveloppe atmosphérique reçoivent en effet continuellement 173 millions de milliards de watts de rayonnement solaire, soit la puissance de 173 millions de nos plus grosses centrales électriques. Certes, cette ressource n'est pas également répartie, mais les régions densément peuplées du Québec enregistrent tout près de la moitié de la densité de rayonnement annuel qui inonde... le Sahara!

77 pour cent de cette énergie est réfléchie, ou absorbée puis rayonnée sous forme de chaleur (rayonnement infrarouge) par le sol ou l'atmosphère terrestre. Les échanges thermiques qui s'ensuivent, entre les masses d'air inégalement chauffées, sont à l'origine de tous les vents, et le moulin à vent est, à sa manière, un collecteur indirect d'une infime partie de l'énergie solaire absorbée par l'air. Les 23 pour cent qui restent de l'énergie solaire sont absorbés par l'eau et contribuent à l'évaporation, puis à la formation des nuages. Une fois de plus, cette énergie est libérée lors des averses, puis dans le heurt des masses d'eau des chutes et des rivières. L'énergie hydraulique n'est donc, elle aussi, qu'une manifestation indirecte de cette énergie solaire captée par l'eau.

Aux côtés des grands flux d'énergie dissipés dans l'environnement, une fraction d'un demi-millième à peine de cette énergie solaire est captée par les plantes, où elle contribue à la construction de molécules organiques complexes. C'est donc cette énergie qui non seulement entretient toute la végétation terrestre, mais nourrit ensuite toute la faune, y compris l'homme. Si toutes les molécules organiques ainsi produites étaient consommées, elles pourraient combler les besoins alimentaires d'une population mondiale 200 fois plus nombreuse, et l'énergie chimique qu'elles contiennent représente 10 fois notre consommation totale d'énergie mécanique et thermique actuelle. C'est d'ailleurs parce que l'homme ne l'a jamais entièrement «brûlée» que cette énergie a pu s'accumuler au cours des siècles sous forme d'humus et de tourbe, puis de dépôts fossiles de pétrole, de charbon et de gaz.

Et comme si ce bain d'énergie radiante n'était pas suffisant, notre bonne vieille terre y ajoute sa part, en rayonnant sa propre chaleur interne, alors que ses masses d'eaux de surface, attirées tour à tour par la lune et le soleil et ballottées par les vents, dissipent aussi en surplus une énorme quantité d'énergie, dans le jeu des vagues et des marées.

Alors pourquoi parle-t-on de crise d'énergie? C'est que ces ressources surabondantes sont intermittentes (il ne fait pas toujours soleil), et surtout diffuses. Il tombe plus d'énergie solaire radiante sur le territoire de la Baie James qu'on y puisera d'énergie hydro-électrique; mais pour récolter la seconde, quelques barrages suffisent en des endroits stratégiques, alors qu'il faudrait répartir partout des collecteurs solaires pour drainer l'énergie rayonnante. De même, un réservoir d'huile de 100 gallons assure à une résidence moyenne une autonomie de quelque 20 jours de chauffage en hiver, et n'occupe que quelques mètres cubes. Le chauffage domestique au bois nécessite déjà des volumes de stockage beaucoup plus grands, et il s'agit pourtant là d'une forme partiellement concentrée d'énergie solaire.

Des ressources redécouvertes

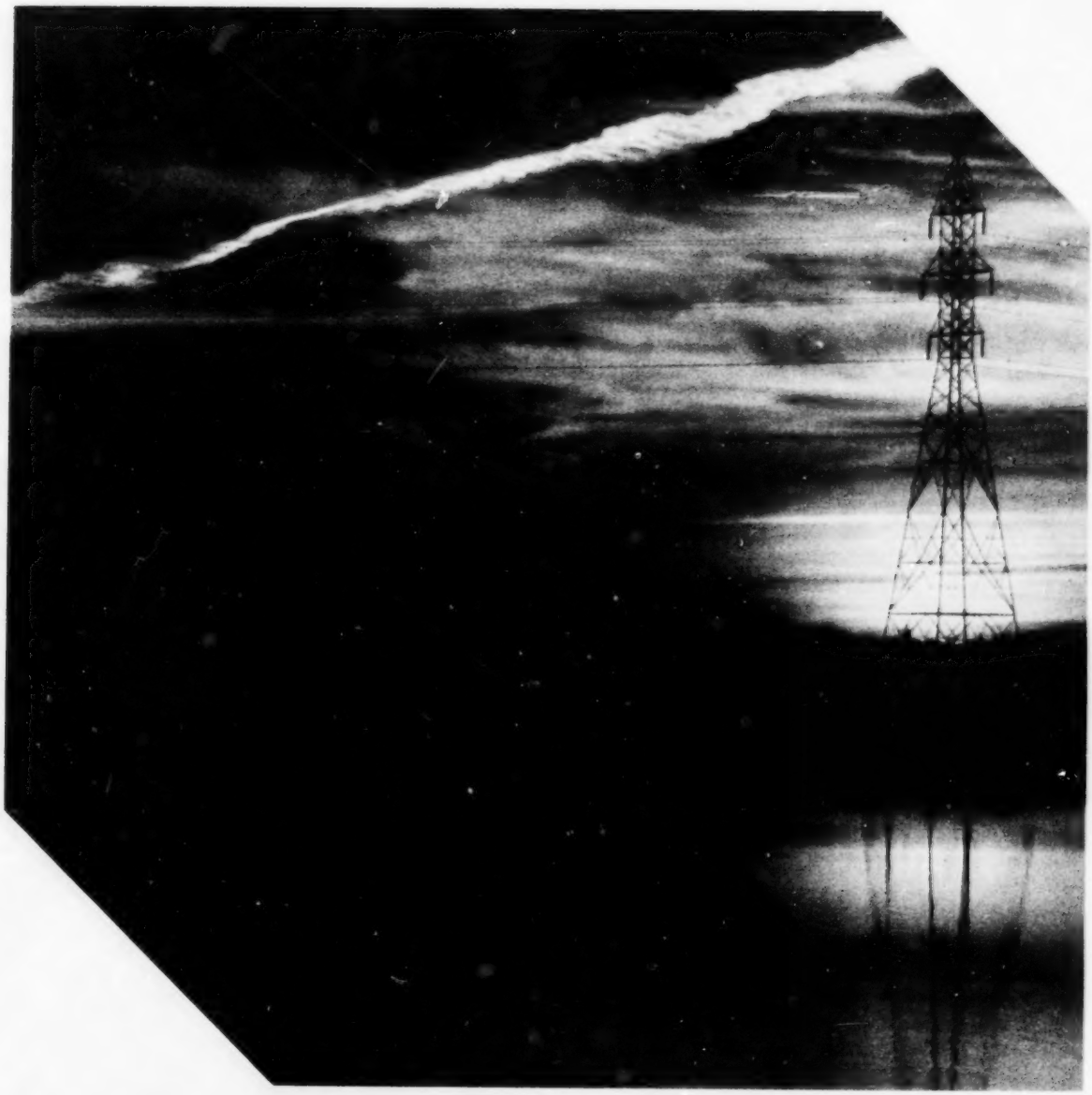
Pourtant, des méthodes existent pour utiliser une certaine partie de cette énergie inépuisable. Certaines d'entre elles sont éprouvées depuis des siècles: ce sont les serres, les moulins à vents, et surtout toutes les utilisations énergétiques de la biomasse, à commencer par le banal chauffage au bois. La question qui se pose est la suivante: au moment où les ressources fossiles s'épuisent, et où l'humanité songe à miser sur l'énergie interne des atomes, cette énergie diffuse peut-elle être «redécouverte» et jouer un rôle important dans notre avenir énergétique?

Elle se pose d'une manière encore plus particulière en ce qui nous concerne. Nous vivons dans un climat froid où l'ensoleillement peut paraître capricieux. Nous jouissons d'un couvert forestier abondant, mais largement sollicité pour d'autres fins. Il n'y a pas chez nous de geysers ou de sources thermales qui nous permettent d'espérer de grandes ressources géothermiques... Est-ce à dire que le Québec sera aussi absent de cette course aux «énergies nouvelles» qu'il fut tenu à l'écart des enjeux pétroliers? Absolument pas! Car si certaines applications de ces énergies de rechange paraissent difficiles pour nous, d'autres nous sont d'ores et déjà accessibles.

Et c'est là-dessus qu'entend s'arrêter cette brochure: un rapide tour d'horizon des techniques nouvelles de production d'énergie à partir des ressources renouvelables, afin de préciser lesquelles ont un avenir pour le Québec, et à quelles conditions.

Première partie

L'usage direct du rayonnement solaire



Une énergie à harnacher

L'énergie rayonnante du soleil nous est tellement familière qu'on a trop souvent tendance à la sous-estimer. Il suffirait pourtant de recouvrir un millième de la surface planétaire par des collecteurs n'ayant qu'un rendement de 5 pour cent pour disposer annuellement de 17 milliards de mégawatts-heures: cela représente 20 fois la consommation mondiale d'électricité! Solution purement théorique toutefois, puisqu'à cette échelle, il faudrait 6 900 kilomètres carrés (sans parler des espaces perdus pour l'infrastructure) pour satisfaire les besoins actuels du Québec, et l'électricité ainsi produite serait disponible surtout l'été, de jour, et en période ensoleillée, au moment où l'on en a moins besoin.

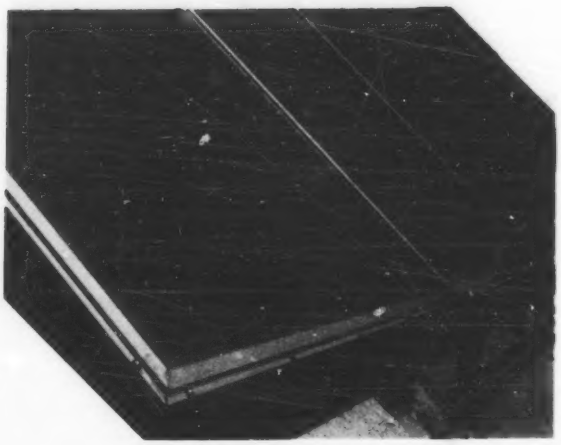
La région montréalaise est tout de même baignée par un rayonnement solaire moyen actuel de 145 watts par mètre carré. Il est nul de nuit, plus faible par journée couverte, et par conséquent beaucoup plus fort par journée ensoleillée. C'est une ressource non négligeable. Mais pour la mettre à contribution, il faut savoir la capter, et la tenir «en réserve» pour nos besoins.

Les capteurs les plus simples fonctionnent sur le principe bien connu des agriculteurs: l'effet de serre. Toute surface sombre absorbe une partie du rayonnement visible et s'échauffe en conséquence. Elle réémet ensuite cette énergie sous forme de chaleur, i.e. par rayonnement infrarouge. Une vitre placée au-dessus de cette surface laisse passer parfaitement la lumière solaire incidente (d'où sa transparence au visible), mais réfléchit efficacement le rayonnement infrarouge en provenance de la surface chauffée. Ce dernier se trouve donc comme «emprisonné» sous la vitre, et cela produit un échauffement considérable de l'air compris entre la surface et la vitre. Dans un capteur solaire, le matériau chauffant sera de préférence noir et mat, afin d'absorber au maximum le rayonnement visible, et la chaleur concentrée entre cette surface et la vitre sera évacuée, par circulation d'air ou par circulation d'un liquide, vers des réservoirs de stockage (un bassin d'eau, de roches, ou de paraffine, par exemple) pour être réutilisée lorsque nécessaire.

On peut obtenir des températures beaucoup plus élevées en ne se contentant pas d'emprisonner les calories solaires entre deux plaques, par effet de serre, mais en concentrant au préalable le rayonnement le long d'un axe, ou même en un point unique. L'exemple le plus familier de ce phénomène est la production d'une flamme à partir d'une loupe qui concentre le rayonnement du soleil en son point focal, mais le même phénomène peut être produit, à une échelle beaucoup plus grande, par l'utilisation de miroirs orientables qui dirigeront toujours le rayonnement normalement dispersé sur un vaste territoire, vers une «chaudière» de volume réduit.

Autre façon de recueillir l'énergie solaire: certains alliages ont la propriété d'émettre des électrons lorsqu'ils sont frappés par des particules de lumière. Cette propriété peut être mise à profit pour faire circuler dans ces matériaux de faibles courants électriques. C'est l'effet «photovoltaïque» déjà largement répandu dans le cas d'équipements requérant un faible courant. Mais ne serait-ce que le prix élevé des composés photo-électriques, rien n'empêche d'obtenir des courants importants en multipliant les surfaces exposées au rayonnement.

Tous ces procédés ne sont pas également prometteurs au Québec, à cause de l'irrégularité de notre ensoleillement, qui tend à disqualifier les installations trop coûteuses. Pourtant, l'apport éventuel de ces différentes techniques solaires à la satisfaction de certains de nos besoins pourrait devenir important, même à court terme.



Chapitre 1

L'effet de serre et le chauffage à basse température

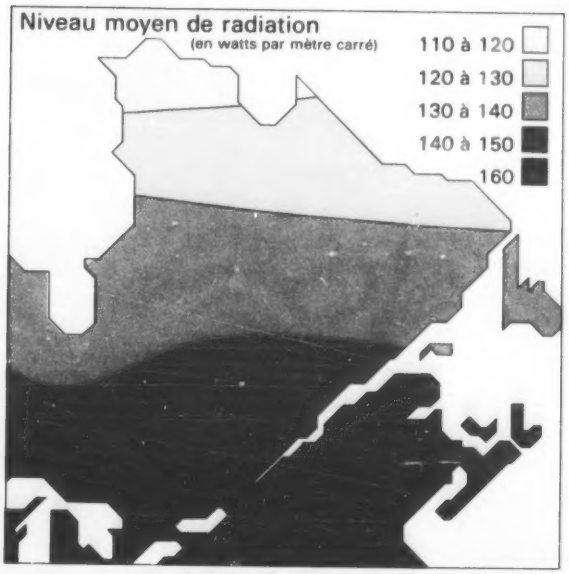
À sa manière, un capteur solaire par effet de serre peut être comparé à un barrage hydraulique, en ce qu'il retient une partie de l'énergie solaire dans un réservoir artificiel, entre la surface noire et la vitre. Comme dans le cas d'un barrage, il y a toutefois un point de saturation à partir duquel la chaleur s'échappe de la surface vitrée, comme l'eau s'écoule d'un barrage trop plein. On peut toutefois augmenter cette température maximale en modifiant la nature du « barrage ». Par exemple, si les capteurs les plus simples n'atteignent que rarement la température d'ébullition de l'eau (100 degrés celsius), un capteur où la surface chauffante et la surface vitrée sont séparées par un espace où est pratiqué le vide, peut atteindre des températures supérieures à 170 degrés (140° par temps froid). D'autres modèles utilisent des surfaces dites «sélectives» qui réémettent la chaleur sur des longueurs précises. Il suffit alors de traiter la vitre pour qu'elle réfléchisse parfaitement ces longueurs d'ondes. On peut aussi jouer sur le choix des matériaux, sur les configurations, ou sur l'épaisseur des vitres, mais toutes ces variantes accroissent alors le prix des dispositifs.

Les températures atteintes dépendent aussi des conditions extérieures, comme la température de l'air, la vitesse et la direction du vent et la densité de l'ensoleillement. Mais pour un capteur donné, le rendement thermique, c'est-à-dire la capacité de retenir les calories reçues du rayonnement solaire, diminue toujours à mesure qu'augmente la différence entre la température interne et la température externe, pour tomber à zéro lorsqu'on atteint la différence de température maximale du système. Le capteur ne parvient dès lors plus à capter la moindre calorie additionnelle.

Le rendement global du système solaire dépendra donc non seulement des caractéristiques de ses capteurs et du climat ambiant, mais aussi de l'efficacité avec laquelle la chaleur captée est ensuite évacuée du réservoir pour être utilisée ou stockée. En fait, l'ensemble des composantes: capteur, aire de stockage, échangeur de chaleur et conduits forment un système dont la gestion (c'est-à-dire: à quelles températures la pompe à eau ou à air doit-elle se mettre en marche?) par un système de contrôle (généralement simple) est aussi importante que l'efficacité thermique du capteur à convertir le rayonnement reçu en chaleur du caloporteur.

Dans les systèmes «passifs», cette évacuation est obtenue par simple transfert de chaleur entre l'espace chauffé et le lieu de stockage ou d'utilisation, alors que dans les systèmes «actifs» au contraire, cette évacuation est obtenue en faisant circuler, entre la surface noire et la vitre, un fluide caloporteur: le plus souvent de l'air, de l'eau ou du glycol (antigel). Quel que soit le capteur choisi, l'utilisateur aura intérêt à maintenir entre l'air ambiant et ce fluide chauffé une différence de température assez faible, afin de maximiser l'efficacité thermique de sa «fournaise solaire», et d'amoindrir du même coup les problèmes posés par l'isolation des conduites de circulation et du bassin de stockage de cette chaleur captée. Pour cette raison, les dispositifs à effet de serre demeurent réservés aux usages thermiques à basse température.

Un coup d'œil sur la consommation énergétique québécoise nous révèle toutefois l'importance considérable de ces utilisations dans notre bilan annuel. Un quart du total de l'énergie que nous consommons nous sert à chauffer les locaux ou à fournir notre eau chaude sanitaire, alors



Les chiffres de cette carte correspondent à l'ensoleillement annuel moyen reçu par une surface horizontale. Une surface orientée face au soleil (avec un angle variant entre 30 et 60 degrés) reçoit encore plus d'énergie. La moyenne annuelle est aussi réduite par le fait qu'elle inclut les périodes nocturnes et les journées nuageuses. Les niveaux diurnes sont nettement plus élevés en conséquence.

qu'une tranche additionnelle de 15 pour cent est utilisée sous forme de vapeur ou de chaleur industrielle à moins de 140° C.

a) le chauffage des locaux

Parmi ces usages, la part du lion va au chauffage des locaux résidentiels ou commerciaux. C'est donc le premier débouché potentiel des fournaises solaires. Dans ce secteur d'ailleurs, les possibilités techniques sont depuis longtemps démontrées. Malgré l'intermittence du soleil et les rigueurs de notre climat, il n'est pas une région du Québec où il serait impossible de chauffer entièrement une résidence au moyen de capteurs solaires. Tout le problème est de savoir à quel prix cet objectif pourrait être atteint.

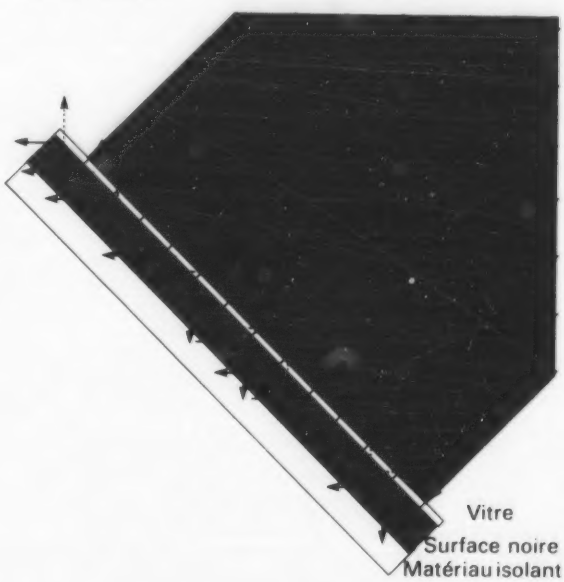
Pour l'instant, le coût initial élevé des dispositifs solaires et les frais d'entretien rendent encore cette solution plus coûteuse à court et à moyen termes que le recours à un chauffage conventionnel. À long terme toutefois, le caractère compétitif des dispositifs solaires ne fait pas de doute. En outre, comme l'on s'attend à de fortes hausses du prix des ressources énergétiques conventionnelles et qu'au contraire, le prix des équipements solaires devrait diminuer avec le développement de ce marché nouveau, on peut prévoir que d'ici quelques années, il deviendra rentable, même à court terme, d'opter pour le soleil.

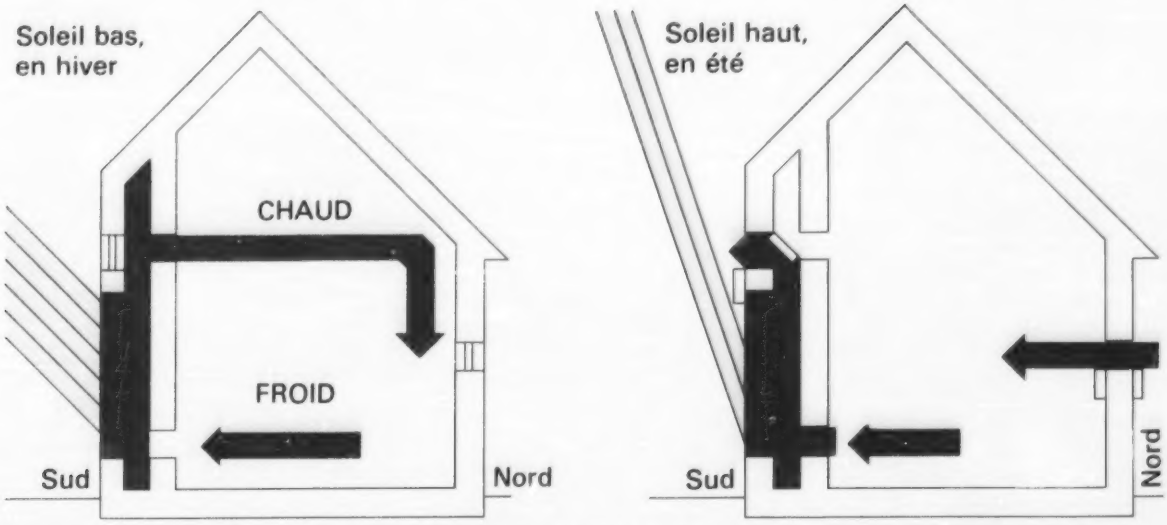
Les dispositifs solaires les plus simples sont les systèmes passifs. Grâce à de larges fenêtres, orientées vers le sud, derrière lesquelles une surface sombre sert à la fois de plaque chauffante et de stockage, c'est en quelque sorte toute la maison qui devient serre. Dans le système breveté par les ingénieurs français J. Michel et F. Trombe, la fenêtre et la plaque (un mur de béton peint en noir) sont séparées par un espace plutôt restreint. L'air qui est chauffé dans cet espace opère donc un mouvement ascendant, ce qui attire, par des orifices pratiqués à la base du mur, l'air plus frais de la maison. Il s'ensuit donc un mouvement constant de l'air chauffé en direction de la maison, en provenance des plafonds. L'avantage de cette configuration passive sur la simple serre repose dans le fait qu'en été, lorsque la température devient trop chaude, des trappes peuvent être ouvertes dans la toiture, juste au-dessus de la colonne d'air ascendante, créant dans l'ensemble de la maison un appel d'air qui peut provenir, quant à lui, d'ouvertures pratiquées à l'ombre, du côté nord. Cette circulation d'air diminue alors d'autant les besoins de climatisation.

Dans la gamme des systèmes actifs, les moins complexes sont aussi ceux qui utilisent l'air comme caloporteur. Cela élimine les problèmes de corrosion et de plomberie étanche, simplifie les systèmes de pompage, et rend accessible même à un bricoleur moyen l'installation des dispositifs. Enfin, leur légèreté permet en outre de les installer sur les toits de la plupart des lieux d'habitation. Toutes ces raisons font aussi de ces systèmes ceux qui coûtent le moins cher à installer et à entretenir.

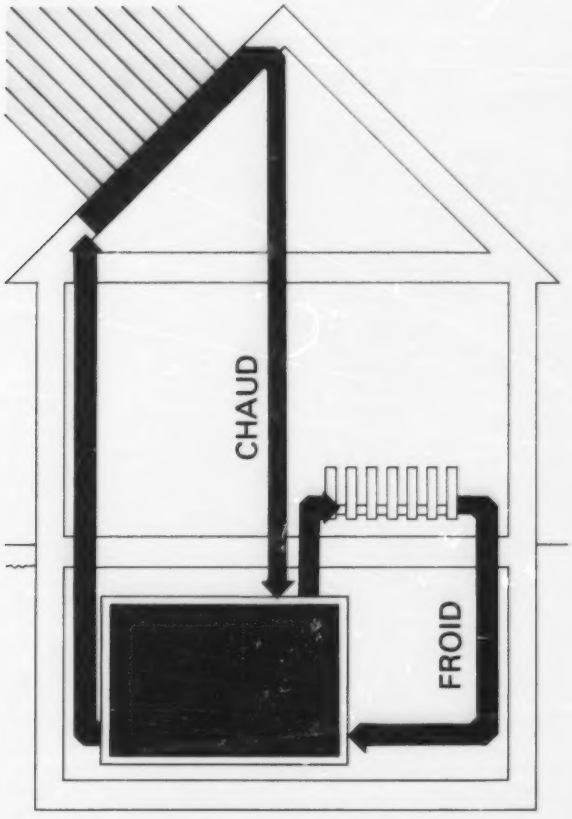
Mais l'air n'est pas le caloporteur le plus efficace. De plus, le stockage de la chaleur portée par l'air se fait généralement dans des bassins de roches, dont le pouvoir calorifique, par unité de volume, est plutôt faible. Si l'on cherche à accroître l'autonomie du système jusqu'à couvrir la quasi totalité du chauffage domestique, les coûts d'érection de ce bassin de stockage deviennent alors prohibitifs. Dans ces circonstances, on aura recours de préférence aux systèmes à eau, plus efficaces pour puiser l'énergie, et réclamant un moindre volume de stockage.

Les radiations lumineuses traversent la vitre du capteur et sont absorbées par la surface noire. L'énergie, réémise sous forme de chaleur (rayons infrarouges) traverse beaucoup plus difficilement la vitre, de sorte qu'elle est tenue «captive» entre la surface noire et la vitre. Cette chaleur peut être évacuée (par circulation d'air ou d'eau) pour être stockée ailleurs.





Le système breveté par les ingénieurs français Michel et Trombe utilise un mur de béton noir derrière une façade vitrée de la maison. L'air chauffé entre la vitre et le mur acquiert un mouvement ascendant, tirant l'air de la maison par une ouverture située à la base du mur. Cela crée un mouvement de tourbillon qui réchauffe la maison. L'été (dessin de droite), une ouverture au sommet du « collecteur » laisse fuir l'air chaud, créant une circulation d'air dans la maison, en provenance de la façade nord, ombragée et plus fraîche.



Dans un système actif, la circulation de la chaleur est assurée grâce à un caloporteur mû par un système de pompage. La chaleur est stockée dans un réservoir isolé, d'où sera alimenté le circuit d'eau des calorifères. Un élément électrique placé dans le réservoir ou sur le circuit des calorifères assure le chauffage d'appoint, lorsque nécessaire.

Pour éviter les problèmes de corrosion, l'arrêt des pompes assurant la circulation de l'eau, du glycol sera ajouté au liquide caloporteur. Cela augmente toutefois légèrement le coût de ce caloporteur (l'air a l'avantage d'être gratuit), mais cela nécessite surtout un système d'échangeurs de chaleur dans le bassin de stockage, puisque le liquide circulant dans les capteurs n'est plus le même que celui qui fournira le chauffage ou l'eau chaude pour usages domestiques.

Parmi les systèmes à caloporteur liquide, les «tubes à vide» constituent une innovation récente très prometteuse. En gros, les collecteurs ressemblent à des tubes fluorescents géants. La face orientée vers le soleil est constituée d'un verre transparent, alors que l'autre moitié du tube est recouverte sur sa paroi intérieure d'une mince couche argentée qui agit comme un miroir. Les rayons solaires incidents pénètrent donc dans le tube à vide, et sont réfléchis (concentrés) vers son axe central, où passe justement un tuyau peint en noir, assurant la circulation du caloporteur. C'est donc ce tuyau qui se trouve chauffé, et l'absence d'air à l'intérieur du tube de verre élimine presque complètement les pertes de chaleur par conduction. En cas de rayonnement direct, la concentration relative des rayonnements lumineux le long de l'axe augmente l'efficacité du transfert de chaleur, et permet en conséquence d'augmenter le débit du caloporteur. Cet avantage est toutefois amoindri par le fait qu'en hiver, jusqu'à 50 pour cent du rayonnement lumineux reçu par un capteur est formé de radiation diffuse (celle qui est diffusée par l'air et les nuages ou réfléchie par la neige), qui n'est guère concentrée sur l'axe même du tube. Pour compenser, on peut multiplier la surface efficace de captage de la chaleur en faisant passer dans chaque tube un tuyau additionnel excentrique, situé en avant du premier. Dans les conditions d'ensoleillement du Québec où le rayonnement diffus est assez important par rapport au rayonnement direct, certaines améliorations à apporter au capteur à vide, permettront de justifier son coût plus élevé que le capteur plan.

b) stockage saisonnier et pompes à chaleur

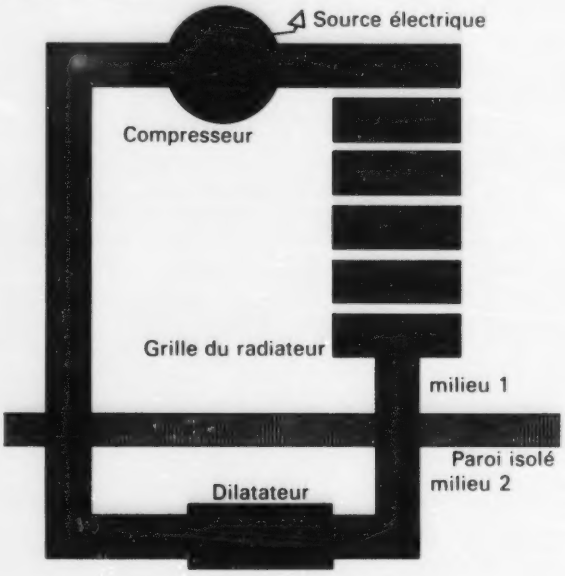
La majorité des systèmes de chauffage domestique solaire envisagés jusqu'à maintenant au Québec ne sont conçus que pour fournir une partie des besoins annuels, et nécessitent donc un système conventionnel d'appoint. La raison en est très simple. Les caractéristiques de notre climat font qu'il faudrait suréquiper le système de captage et de stockage de chaleur pour prévoir les pires conditions climatiques d'hiver (une saison anormalement froide, avec des passages de plusieurs jours d'ennuagement complet, par exemple) alors que ce système «lourd» demeurerait inutilisé pendant l'été, et qu'il serait même excessif pour les périodes plus tempérées de l'automne et du printemps.

Une solution consisterait à mettre en place des bassins de stockage saisonnier, c'est-à-dire capable d'accumuler la chaleur pendant les journées ensoleillées de l'été pour la restituer progressivement tout au long de l'hiver. Pour l'instant, les exigences, en termes de volume et d'isolation, pour de tels réservoirs de stockage, les rendent inabordables pour un particulier, mais ils pourraient bien se rentabiliser dans le cadre d'équipements collectifs. Les besoins d'isolation varient en effet en fonction de la surface des parois du bassin, alors que sa capacité thermique varie en fonction du volume; plus le bassin est vaste, moins son isolation coûte cher, par calorie emmagasinée. En outre, un tel bassin collectif pourrait être chauffé par le réseau d'électricité, en dehors des heures de pointe, contribuant ainsi à la stabilisation de la demande électrique... Mais nous quittons là le strict domaine de l'énergie solaire.

Il existe une autre technique permettant d'augmenter l'efficacité de l'utilisation de la chaleur solaire, jusqu'à assurer peut-être à moindre coût l'autonomie totale d'une résidence solaire: c'est la pompe à chaleur. Dans tout processus de transfert de chaleur, le flux d'énergie s'effectue de la source chaude vers le milieu froid, à un rythme qui dépend de la différence de température (gradient) entre les deux milieux. Plus cette différence est élevée, plus le flux d'énergie sera important, et à capacité thermique égale, on obtient un transfert beaucoup plus grand avec un faible volume de caloporteur très chaud qu'avec un grand volume de caloporteur tiède.

Pourtant, nous sommes familiers avec un appareil domestique qui semble contredire le premier de ces principes: le réfrigérateur. Dans ce cas, bien qu'il fasse nettement plus froid à l'intérieur qu'à l'extérieur, le compresseur continue de drainer les calories du milieu froid vers le milieu chaud (la pièce). Cela repose sur un phénomène physique assez simple: en comprimant un gaz, il s'échauffe; en le laissant se détendre brusquement, il se refroidit. Ainsi, si on comprime le gaz circulant dans les conduites du réfrigérateur, mais que cette compres-

Un gaz tiède est compressé fortement. Il s'échauffe. Dans un radiateur, il perd sa chaleur pour redevenir tiède. De l'autre côté de la paroi, il passe dans un dilatateur où il est brusquement refroidi, et absorbe la chaleur du second milieu, pour redevenir tiède, et recommencer le cycle. Il s'ensuit un véritable pompage des calories, toujours absorbées dans le milieu 2 pour être perdues par irradiation dans le milieu 1.



sion a lieu à l'extérieur de l'enceinte réfrigérée, le gaz devient très chaud, et il perd «naturellement» ses calories en direction de la pièce qui est plus froide. Si par la suite on laisse ce gaz comprimé se détendre brusquement à l'intérieur de l'enceinte, il devient plus froid que celle-ci. Là encore, le flux «naturel» de l'énergie réchauffera ce gaz caloporteur. Il s'ensuit donc un flux constant des calories de l'intérieur de l'enceinte vers le gaz, puis du gaz vers l'extérieur. C'est le principe de la pompe à chaleur.

Bien entendu, personne ne songerait à utiliser le réfrigérateur domestique comme source de chauffage. Le rendement thermique de ces échanges de chaleur est si faible qu'il ne rembourserait jamais l'investissement en électricité nécessaire pour actionner le compresseur. Mais rien n'interdit qu'on installe un tel système de pompage des calories entre deux milieux de températures à peu près voisines, ou même pour accélérer le flux d'énergie d'un milieu chaud à un milieu froid. Le gaz dilaté absorbera d'autant plus facilement les calories que le milieu «source» est chaud, et il restituera d'autant plus efficacement ces calories après compression que l'autre milieu (la pièce à chauffer) est froid.

Théoriquement, on pourrait donc utiliser simplement l'air ambiant à l'extérieur de la maison comme source de calories. Malheureusement, c'est pendant l'hiver que nos maisons ont le plus besoin de chauffage. Or, l'hiver, l'air extérieur est en dessous du point de congélation, et la pompe à chaleur n'a alors guère plus de rendement comme chaufferie... qu'un réfrigérateur. Mieux vaut utiliser l'énergie électrique directement pour le chauffage.

Tel n'est pas le cas, par contre, si on utilise, comme source de calories, l'eau d'un bassin de stockage de l'énergie solaire. Comme la pompe à chaleur augmente dans ce cas l'efficacité du transfert de l'énergie du bassin vers les espaces à chauffer, on peut alors continuer à drainer de l'énergie même d'un bassin qui serait devenu trop tiède pour fournir autrement un chauffage adéquat. Cela augmente donc d'autant le rendement du bassin de stockage (c'est-à-dire l'autonomie qu'il assure). Mais ce n'est pas tout. Nous avons en effet mentionné que l'efficacité de tous les capteurs solaires diminuait avec l'augmentation de l'écart entre la température du caloporteur et la température extérieure. Par temps très froid, l'utilisateur aura donc intérêt à abaisser nettement la température du caloporteur, s'il veut maintenir un certain rendement à sa fournaise solaire. La possibilité d'utiliser les calories d'un bassin plus tiède, grâce à une pompe à chaleur, permet donc d'accroître du même coup le rendement des capteurs.

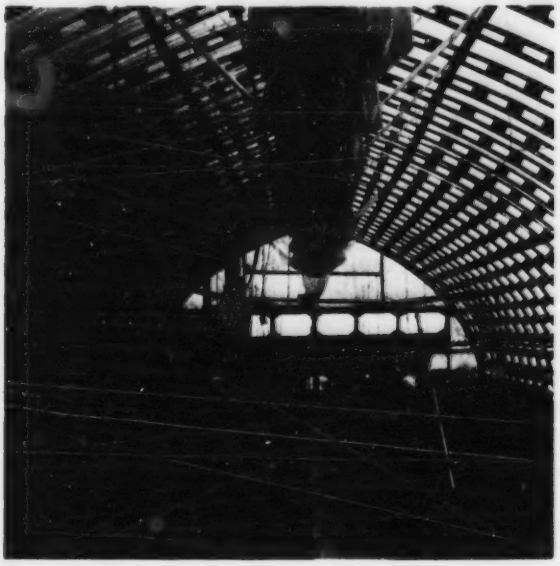
Ainsi, 50 mètres carrés de capteurs solaires, couplés à un bassin de stockage à eau chaude de 140 000 litres, dans le cas de systèmes commerciaux disponibles aujourd'hui, peuvent stocker au-delà de 80 milliards de joules (75 millions de BTU), sous des conditions climatiques moyennes pour la région de Montréal. De cette énergie, 70 pour cent seulement (environ 55 milliards de joules) pourront être utilisés pour le chauffage domestique ou la fourniture d'eau chaude sanitaire. L'utilisation d'une pompe à chaleur permettrait d'obtenir le même rendement de captage avec une surface réduite à moins de 40 mètres carrés, et le bassin de stockage pourrait être réduit en volume par un facteur 5, tout en livrant la même quantité d'énergie utile. De telles économies sur les capteurs et le bassin de stockage compensent largement pour le coût, encore assez élevé, des pompes à chaleur, et la demande d'électricité pour le fonctionnement du dispositif est de 5 à 10 fois moindre que pour un chauffage électrique conventionnel (dépendant de la température de l'eau du bassin de stockage).

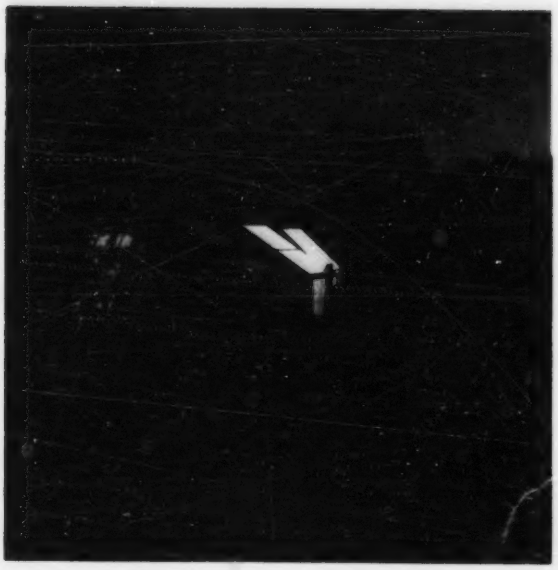
c) Chauffe-eau et piscines

Il existe d'autres façons de rentabiliser un équipement solaire, pour compenser sa non-utilisation pendant la période estivale. La fourniture d'eau chaude en est un, puisque dans ce cas la demande varie très peu d'une saison à l'autre. De petits chauffe-eau solaires à capteurs modulaires se vendent présentement sur le marché et sont déjà concurrentiels, à condition certes que la durée de vie des capteurs promise par le fabricant soit réellement atteinte.

Le chauffage des piscines se présente aussi comme une utilisation très avantageuse des «fournaises» solaires. Au cours des premières semaines de l'été, même un ensoleillement considérable ne parvient que très lentement à hausser la température de l'immense volume d'eau contenu dans une piscine de bonne dimension. De nombreuses familles utilisent donc un système de chauffage d'appoint, qui fonctionnera ensuite de manière discontinue pour maintenir constante la température de l'eau jusqu'à la fin de septembre dans certains cas. L'utilisation d'un dispositif solaire apparaît alors comme tout désigné. Les capteurs solaires pouvant alors être placés à l'extérieur, à proximité de la piscine, le coût de plomberie s'en trouve réduit à presque rien. Il n'est guère besoin alors de système de stockage, puisque le grand volume d'eau de la piscine ne verra sa température fluctuer que de très peu, même après quelques jours sans soleil.

Or il y a au Québec quelques expériences hybrides utilisant des capteurs modulaires à la fois pour le chauffage d'une piscine et pour la fourniture d'eau chaude sanitaire. En hiver, alors que l'efficacité des capteurs et le niveau d'ensoleillement diminuent, toute la surface collectrice sert à la production d'eau chaude. La rentabilité financière d'un tel système ne fait pas de doute dans les cas où l'utilisateur installe lui-même ses capteurs et son réservoir d'eau chaude.





L'Institut de recherche Brace a développé un modèle de serre solaire adaptée aux conditions québécoises. Seule la surface sud est vitrée, alors que la surface nord, bien isolée, est couverte d'un matériau qui réfléchit le rayonnement vers le sol, augmentant d'autant le rendement de la serre.

d) Les serres et le séchage

Deux autres utilisations de l'énergie solaire paraissent intéressantes à court terme. Il s'agit du séchage industriel ou agricole, et de la culture en serre.

Dans le premier cas, le séchage des produits ne nécessite en général que des températures modestes. Dans le cas des produits agricoles, cette opération est requise à la saison des récoltes, alors que le soleil est encore abondant. Quoique de nombreuses unités de toute petite dimension aient été mises à l'essai avec succès, au Québec comme ailleurs, la rentabilité d'une usine de séchage solaire de grande ou moyenne dimension reste à établir, mais elle demeure pour l'instant fort probable.

Dans le cas des serres, on rappellera d'abord que ce type de bâtiment est, en lui-même, un capteur solaire. Toutefois, comme la culture en serre n'est intéressante qu'aux périodes où la température peu clémente ne permet pas la culture à ciel ouvert, les serres commerciales ont besoin d'un chauffage d'appoint considérable, la nuit surtout. L'addition d'un bassin de stockage de la chaleur accumulée pendant le jour, et, si nécessaire, quelques capteurs modulaires additionnels, peut fournir l'essentiel de ce chauffage d'appoint.

Notons enfin que l'Institut de recherche Brace, de l'Université McGill, a conçu une serre redessinée pour les besoins québécois, avec une surface vitrée au sud, et une surface réfléchissante isolée du côté nord. Un tel concept, encore au stade des prototypes, pourrait augmenter considérablement le rendement énergétique (et économique) de la culture en serre au Québec.

e) pour lutter contre le soleil

Dans de nombreux pays, des chercheurs ont été séduits par l'idée d'utiliser l'énergie solaire pour lutter contre les inconvénients... de l'ensoleillement! Il ne s'agit en somme que d'utiliser la chaleur solaire comme source d'énergie pour des appareils de climatisation ou de réfrigération. Et bien sûr, puisque ces appareils fonctionnent généralement à l'électricité, la solution technologiquement la plus simple serait de produire de l'électricité solaire. Nous verrons dans les prochains chapitres que ce n'est pas si facile: les piles photovoltaïques sont pour le moment coûteuses, et les chaudières thermo-électriques exigent de très hautes températures.

Pourtant, on connaît depuis un siècle la possibilité de réaliser des moteurs thermiques, même à partir de sources de chaleur à basse température, et la première pompe alimentée par l'énergie obtenue dans des capteurs à effet de serre date du début des années 1960. Certains fluides à basse température d'ébullition, comme le butanol ou le fréon, peuvent en effet être vaporisés dans de tels capteurs, la vapeur produite servant ensuite à faire tourner une turbine. De telles pompes sont largement utilisées dans certains pays tropicaux pour l'alimentation en eau de lieux isolés.

Dans le cas de la réfrigération, le moteur solaire pourrait produire un faible courant électrique, mais le rendement théorique de l'opération demeure très faible. Par contre, une pompe solaire peut actionner directement le cycle compression-décompression d'un réfrigérateur (ou d'un climatiseur) de type classique. Au Québec toutefois, le coût des capteurs n'est guère justifié par la faible économie de courant que permet un tel dispositif, et même pour les endroits non desservis par le réseau électrique, le compresseur alimenté au gaz ou au pétrole (comme ceux qui équipent les roulottes de camping) sont moins coûteux et plus fiables à l'usage.

Des systèmes passifs peuvent aussi assurer une climatisation et une déshumidification relative des locaux d'habitation. C'est le cas du système solaire «Trombe-Michel» dont il a déjà été question, qui assure pendant l'été dans la maison une circulation d'air en provenance d'ouvertures pratiquées au sol, à l'ombre, et du côté nord. Si le climat est trop humide, un voile déshumidificateur peut être placé dans cette entrée d'air.

Soyons francs toutefois: si ces techniques de réfrigération et de climatisation sont fort utiles dans les pays ensoleillés du Tiers-Monde, ils ne présentent guère d'attrait réel chez nous, mis à part peut-être les systèmes totalement passifs qui ne coûtent à peu près rien, et ne constituent somme toute qu'une manière plus intelligente de concevoir nos maisons.

Chapitre 2

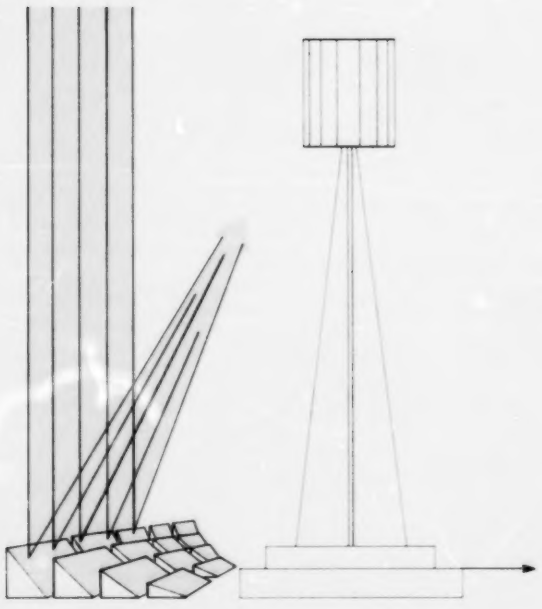
La concentration d'énergie solaire et la production d'électricité

Un second mode de captage de l'énergie solaire repose sur la concentration, en un petit volume, du rayonnement reçu sur de grandes surfaces. À Odeillo, dans les Pyrénées françaises, existe présentement le plus gros ouvrage de ce genre. Il s'agit d'un immense miroir parabolique vertical de 54 mètres par 40, qui focalise le rayonnement solaire sur un four d'une dimension de quelques mètres cubes à peine. Comme un miroir d'une telle dimension ne peut guère être déplacé sans cesse pour faire face au soleil, les chercheurs français l'ont orienté face au nord, devant le versant d'une colline où l'on a disposé 63 miroirs plus facilement mobiles. Ce sont eux qui sont orientés continuellement pour suivre la marche du soleil, et diriger son rayonnement vers l'immense miroir du four. Grâce à cet appareillage, des températures de 3 800°C sont facilement atteintes dans l'enceinte chauffée, ce qui est un apport inestimable pour l'industrie de la métallurgie et la recherche fondamentale.

Pourtant, malgré les températures ultra-hautes ainsi atteintes, le volume chauffé demeure de faible dimension, de sorte que le couplage du four avec une chaudière thermo-électrique n'y dégage guère qu'une puissance d'un mégawatt.

Cela n'a pas empêché les scientifiques du «Department of Energy» (DOE) américain de jeter sur papier un projet ambitieux de centrale thermosolaire, où tout un champ de miroirs orientables devrait réfléchir le rayonnement solaire vers une chaudière placée au sommet d'une tour. Pour une puissance de pointe de 100 mégawatts, il faudrait entre 1 et 3 km carrés de collecteurs, occupant un espace au moins deux fois plus vaste (pour éviter que les miroirs ne se portent ombrage les uns les autres). Si rien n'empêche la réalisation technique d'un tel projet, son coût le situe nettement au-dessus de toutes les formes conventionnelles de production d'énergie, et son fonctionnement risque de demeurer délicat, entre autres lorsqu'il s'agira de maintenir en permanence la bonne orientation de milliers de miroirs montés individuellement sur des structures d'acier ou d'aluminium. En outre, une telle centrale, malgré son coût d'investissement énorme, ne fournit du courant qu'en période d'ensoleillement, et doit être complétée par d'autres modes de production ou par des procédés de stockage qui augmentent encore le prix de revient du kilowatt-heure produit. Au Canada, la Commission de contrôle de l'énergie atomique a estimé que les facteurs d'ensoleillement et de température externe multipliaient par un facteur entre 2 et 4 tous les estimés de coûts américains. Aussi bien dire que les centrales à héliotour ont peu d'avenir au Québec, du moins à court terme.

Un troisième mode de concentration, à plus petite échelle celui-là, peut être imaginé: la concentration linéaire. Ici, au lieu de focaliser de vastes surfaces de rayonnement en un point unique, il s'agit de remplacer les capteurs plans par des «gouttières» paraboliques, qui concentrent le rayonnement en leur axe central, où se situe le tuyau assurant la circulation du caloporteur. Les capteurs à vide, dont nous avons décrit le fonctionnement, relèvent en fait de ce genre de configuration. Ils permettent déjà, comme on l'a écrit, d'atteindre des températures de l'ordre de 140 degrés, même par temps froid. En faisant circuler de l'eau sous pression dans les conduites, en augmentant le diamètre des tubes de concentration, en rallongeant les dispositifs collecteurs, il demeure théoriquement possible d'accroître nettement ces tempéra-



Les centrales à héliotour consistent en une chaudière thermique, disposée au sommet d'une tour, au centre d'un champ couvert de miroirs orientables qui concentreront donc vers elle le rayonnement reçu par un très vaste territoire. Les températures atteintes peuvent alors être énormes et alimenter en vapeur des turbines électrogènes de grande puissance.

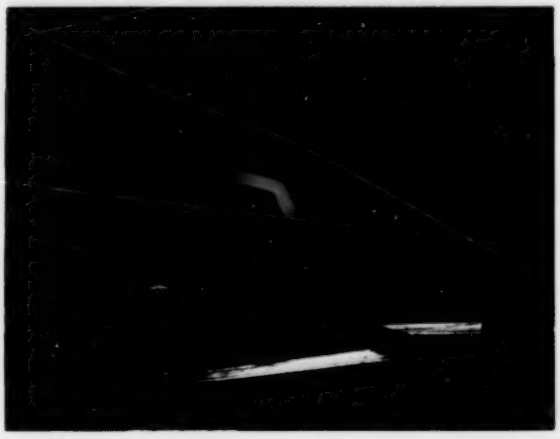
tures, pour obtenir des chaleurs intermédiaires nécessaires à l'industrie. En pays généralement ensoleillé, ce mode de production de vapeur industrielle peut se révéler fort rentable, d'autant plus que les heures de fonctionnement de l'activité économique recoupent en général les heures d'ensoleillement quotidien. Le système d'appoint, au pétrole, peut donc n'être mis en service qu'occasionnellement, par journées nuageuses. Mais sous nos climats, cette rentabilité apparaît plus lointaine, d'autant plus que d'autres modes de production de vapeur (combustion de déchets, utilisation de la vapeur résiduelle d'usines et de centrales conventionnelles ou nucléaires) demeurent plus intéressants.

Notons toutefois qu'il existe des moyens de pallier complètement l'inconstance du soleil, notamment en utilisant l'énergie solaire, lorsqu'elle est disponible, pour produire des combustibles qui, quant à eux, ne seront utilisés que lorsque requis. C'est ainsi que les chaleurs considérables produites par les centrales à héliotour ou à concentration linéaire pourraient n'être pas utilisées directement pour produire de l'électricité, mais bien pour réaliser la synthèse d'hydrocarbures, à partir des roches carbonatées très abondantes à la surface de la planète. Les procédés industriels de cette réduction sont fort bien connus, et leur manque d'intérêt économique vient uniquement du fait qu'aujourd'hui, la chaleur nécessaire à cette réaction est justement produite à partir de combustibles fossiles. Un réacteur thermochimique solaire pourrait alors devenir très intéressant, advenant l'épuisement de ces ressources.

Un autre combustible qu'on pourrait aussi facilement produire à partir de telles centrales solaires pourrait bien jouer un rôle important dans notre société de demain: l'hydrogène. La réaction qui lie ce gaz à l'oxygène de l'air, pour redonner de l'eau, est fortement exothermique, c'est-à-dire qu'elle produit de la chaleur, de sorte que l'hydrogène pourrait remplacer le gaz naturel dans notre économie. En outre, cette réaction peut s'effectuer lentement, dans des piles à combustibles, pour produire de l'électricité, et l'hydrogène apparaît alors comme un mode utile de stockage de cette énergie.

De nombreuses études portent sur les divers cycles chimiques de séparation thermique de l'hydrogène, afin d'obtenir le meilleur rendement, aux températures les plus basses, mais leur implantation définitive nécessitera le développement préalable de «l'économie à hydrogène», c'est-à-dire de l'infrastructure d'accueil et de distribution de ce combustible. Ce transfert devrait prendre au moins une génération encore!

Sur le toit de l'École polytechnique de Montréal, un petit four solaire expérimental.



Chapitre 3

L'effet photovoltaïque

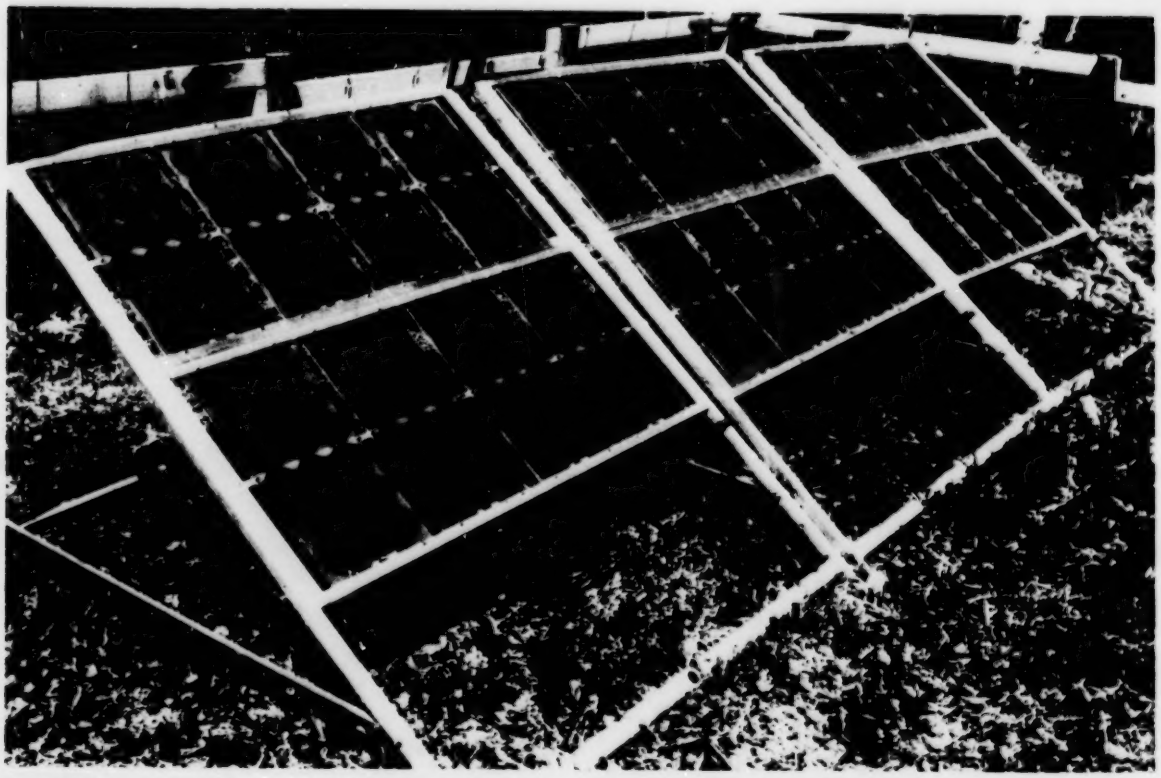
Si la production d'électricité par moteurs thermosolaires à basse température donne un rendement trop faible pour qu'on envisage sa mise à contribution au Québec, et que le climat québécois et son faible niveau d'ensoleillement disqualifient à peu près complètement les chaudières thermo-électriques à concentration solaire, il existe un mode de production directe d'électricité solaire qui n'exige guère de fortes intensités lumineuses: c'est l'effet photovoltaïque.

Si, dans un cristal de silicium, on introduit un tout petit nombre d'atomes de phosphore, la structure cristalline n'est pas détruite, les atomes de phosphore prenant tout simplement la place des atomes de silicium. Toutefois, comme le phosphore a 5 électrons périphériques, l'un d'eux ne pourra se glisser dans le réseau, et sera donc libre de circuler entre les atomes de la structure cristalline. À l'inverse, si on introduit quelques impuretés de bore, qui ne possède que 3 électrons périphériques, on crée un appel d'électron, c'est-à-dire un trou qui se comporte comme une charge positive. En dopant ainsi de manière inverse les deux faces d'une couche très mince de cristal de silicium, on crée une différence de potentiel, mais sans courant électrique puisque les électrons libres sont retenus par leurs atomes positifs, et à l'inverse, les «trous» positifs semblent liés à leurs atomes négatifs. Mais si un photon vient heurter la zone de transition, cela provoque la libération d'un électron qui sera aussitôt attiré par les trous de la zone dopée au bore. À l'inverse, un électron libre viendra se loger dans le trou nouvellement formé de la zone de transition. Il s'ensuit donc un courant d'électrons de la zone de phosphore vers la zone de bore.

Plusieurs autres arrangements moléculaires cristallins produisent aussi un tel effet photovoltaïque. Mais dans les meilleurs cas, les dispositifs mis au point jusqu'à maintenant n'atteignent guère qu'un rendement entre 10 et 25 pour cent, par rapport à l'énergie du rayonnement incident.

Actuellement, les photopiles sont utilisées largement dans des appareils ne nécessitant que des courants faibles, et donc de petites cellules photo-électriques: montres, réveille-matin, systèmes d'alarme , etc... Dans les postes isolés, elles peuvent être non seulement le meilleur système d'alimentation électrique, mais parfois aussi le seul possible: bouées en pleine mer, centres météorologiques arctiques, satellites de télécommunications, etc... Dans un pays froid comme le nôtre, certaines installations isolées peuvent être maintenues à des températures acceptables par des systèmes de pompes à chaleur. Le faible courant qu'elles exigent peut alors être fourni par des piles conventionnelles, rechargées au moyen de cet effet photovoltaïque.

En somme, il s'agit là d'un usage fort prometteur de l'énergie solaire, pour tout système à faible courant. Dans notre bilan énergétique, c'est toutefois une contribution plutôt faible. La question qui se pose concerne la possibilité d'aligner un grand nombre de ces photopiles, pour qu'on puisse générer des courants de grande importance. Le DOE américain a aussi conçu sur papier une centrale à effet photovoltaïque. Là encore, la technologie existe, mais le prix du kilowatt produit est présentement de l'ordre de 150 fois plus élevé que pour une centrale nucléaire ou thermique classique. Au Québec, compte tenu d'un niveau d'ensoleillement moindre, il faudrait une fois de plus multiplier ce chiffre par 2. Et la centrale ne pourrait fonctionner que de jour, à moins d'être

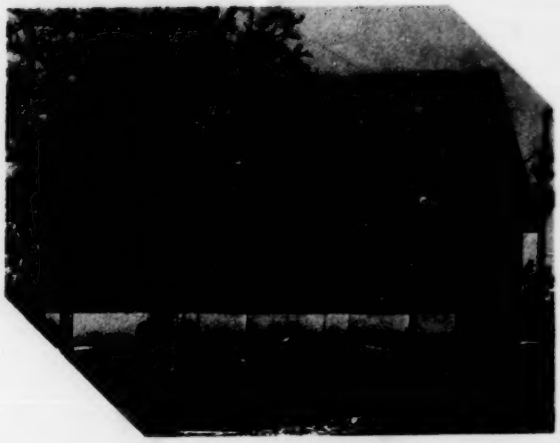


Batterie de cellules photovoltaïque destinées à alimenter un système de réfrigération dans un camping américain.

complétée par des équipements d'appoint ou de stockage considérables.

Bien sûr, l'évolution des techniques en électronique permet des chutes de prix parfois vertigineuses. Ce fut le cas avec les circuits imprimés, et leurs applications dans le secteur des calculatrices et des mini-ordinateurs. De même, l'on peut imaginer que les techniques de fabrication des structures cristallines et de dopage subséquent permettront bientôt de réduire par un facteur de 50 ou même 100 le prix de revient d'une cellule photovoltaïque. Et lorsqu'on accepte de regarder vers un horizon très lointain, on ne peut manquer d'être fasciné par un projet conçu en 1968 par des Américains et présentement à l'étude à la NASA: aller récupérer l'énergie solaire directement dans l'espace. En dehors de l'atmosphère terrestre, l'énergie totale du rayonnement solaire est jusqu'à 15 fois plus élevée que sur terre, puisqu'un satellite bien placé et convenablement orienté peut profiter de cet ensoleillement 24 heures sur 24. Le rendement théorique de photopiles, qu'il s'agisse de l'effet photovoltaïque ou d'autres modes de production de courant (l'effet thermocouple, par exemple, utilise directement la différence de température entre la face exposée au soleil et l'autre face pour générer un courant important), peut aussi être considérablement accru dans de telles conditions. Dans le projet présentement à l'étude, un satellite constitué d'une immense antenne photovoltaïque de quelque 10 kilomètres par 5 et pesant moins de 20000 tonnes (un poids infime, si l'on tient compte de la taille gigantesque de l'appareil) pourrait envoyer en direction de la terre, sous forme d'un faisceau micro-ondes très concentré, ou d'un faisceau laser, une puissance de 5 milliards de watts, captée au sol et reconvertie en électricité. Tout le problème vient du fait qu'une telle structure, immense mais délicate, ne pourrait être construite que sur orbite. Cela suppose donc la mise en orbite préalable d'une station spatiale, servant de quartier général aux astronautes-ouvriers, et la circulation quasi quotidienne de navettes spatiales pour acheminer les matières premières, la main-d'œuvre et les vivres.

Tout cela pour une puissance électrique inférieure à la moitié de celle qu'on tirera du grand chantier de la Baie James! Nous n'y sommes pas encore...



Chapitre 4

Utilisation directe du soleil: un «bilan» prospectif

Oublions donc quelque peu les projets qui frisent encore la science-fiction pour regarder, beaucoup plus près de nous, quel est l'avenir immédiat des techniques solaires que nous venons de survoler. À première vue, ni les centrales photovoltaïques, ni les centrales à chaudière thermique ne semblent être économiquement compétitives sous nos climats. Cela n'exclut pas complètement le recours à la concentration de l'énergie solaire pour des fins industrielles, notamment pour la fabrication de combustibles chimiques qui pourraient éventuellement contribuer à alléger notre déficit énergétique.

Mais c'est principalement du côté des capteurs à effet de serre pour les applications à petite échelle que se dessine l'usage vraiment prometteur à court terme.

Aux États-Unis, il s'est vendu en 1977 pour 150 millions $ d'équipements scolaires. En 1978, il y avait 330 sociétés fabriquant environ 1100 produits différents rattachés à cette technologie nouvelle. Bien sûr, ce marché s'est développé surtout dans le sud du pays, où le soleil est plus abondant et les besoins de chauffage moindres, permettant de rentabiliser plus rapidement l'autonomie totale des résidences solaires; mais le mouvement se porte lentement vers le nord, et a commencé à atteindre le Québec qui compte déjà, en 1979, quatre fabriquants de capteurs.

Certes, il ne s'agit encore que d'un phénomène marginal. Mais les divers programmes gouvernementaux visant à favoriser le développement de cette technologie, devraient bientôt accélérer cette pénétration. Dans un scénario publié en 1977, et qu'il qualifiait de «modéré», le Conseil des sciences du Canada supposait que, dès l'année suivante, 2,5 pour cent des nouvelles unités résidentielles canadiennes pourraient être équipées de capteurs solaires capables de fournir entre 40 et 80 pour cent de leurs besoins de chauffage et d'eau chaude domestique. Ce chiffre devait s'accroître ensuite lentement, pour atteindre 17,5 pour cent des nouvelles unités en 1990. En moyenne, d'ici 1990, 10 pour cent des nouvelles résidences seraient donc «solaires», chiffre auquel il faudrait ajouter une proportion de 3 pour cent des unités résidentielles actuelles que leurs propriétaires pourraient convertir au soleil d'ici cette date.

Un tel objectif représenterait, pour l'industrie solaire naissante, des perspectives de ventes se situant entre 1,5 et 2 milliards $ (en dollars d'aujourd'hui) dont un peu moins du quart au Québec seulement. Dans l'ensemble, ce chauffage solaire allégerait alors d'environ 1 pour cent notre demande énergétique totale.

Lors de la rédaction de son rapport sur la société de conservation, le Conseil des sciences présentait ce scénario comme une borne minimale, allant même jusqu'à considérer comme possibles des objectifs quatre fois plus ambitieux. Si ce scénario est tout de même apparu comme trop optimiste quant au rythme initial d'implantation du chauffage résidentiel solaire (les habitudes des constructeurs sont lentes à changer, et la rentabilité financière des équipements solaires pour leurs usagers n'est pas encore assurée aux prix actuels des ressources conventionnelles), ces chiffres pourraient bien être dépassés grâce aux autres usages des capteurs solaires, en particulier le chauffage des locaux industriels et commerciaux, et le chauffage d'appoint des serres.

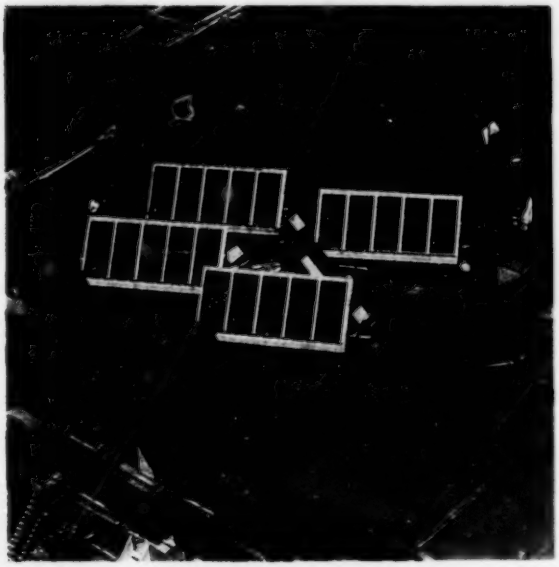
Il existe cependant des domaines où la rentabilité des systèmes solaires est déjà atteinte. Ainsi, pour 1 000$ et plus, dépendant du volume du bassin, un particulier peut se procurer un ensemble complet de chauffage pour sa piscine. Moyennant quelques dollars de plus, le système modulaire extérieur peut être relié, par des conduites isolées, au réservoir d'eau chaude sanitaire de sa résidence, et servir de «pré-chauffe-eau». L'économie d'énergie ainsi réalisée dépend de sa consommation d'eau chaude, de la dimension de son capteur solaire, et de l'ensoleillement cette année là; elle peut représenter dans certains cas jusqu'à 50 pour cent du coût de l'eau chaude. Si l'on tient compte à la fois de cette économie et du prix d'achat et de fonctionnement des systèmes conventionnels de chauffage des piscines, le système solaire est déjà rentable.

Le second secteur où le chauffage solaire est sur le point de devenir compétitif, c'est celui du chauffage d'appoint des serres. La nature même de ces édifices rend facile l'intégration de capteurs rudimentaires, à un coût additionnel marginal, lors de la construction d'une serre. Dans bien des cas, un système passif de stockage de cette énergie solaire recueillie pendant le jour (un mur de pierres, par exemple) suffit à réduire considérablement les besoins de chauffage d'une serre bien isolée (à double paroi, par exemple). Des systèmes sophistiqués, avec circulation d'eau chaude et bassin de stockage, donneraient certes un meilleur rendement par temps trop froids, mais leur coût est aussi plus élevé, et leur rentabilisation plus difficile.

Quant au chauffage des locaux résidentiels, le grand nombre des systèmes disponibles et leur gamme de prix très étendue rendent difficile un calcul global de leur rentabilité. Le prix des capteurs à air varie entre 35$ et 125$ le mètre carré, selon le type de matériaux transparents et absorbants utilisés et la qualité de l'isolation. Les capteurs à caloporteur liquide coûtent 30$ de plus le mètre carré. Les capteurs à vide sont encore plus chers, mais leur excellent rendement implique que le prix par calorie produite se compare présentement à celui des autres systèmes à liquide. Si le prix des bassins de stockage bien isolés varie entre 100$ et 130$ le mètre cube (25 pour cent de plus pour les bassins de roches des systèmes à air), il est toutefois possible d'obtenir des prix plus bas avec des bassins collectifs de dimension beaucoup plus grande.

L'établissement à partir de ces prix du coût de chauffage domestique demeure toutefois impossible, puisqu'il varie en outre en fonction de la dimension de la maison à chauffer, de son isolation, des habitudes de ses habitants, du système d'appoint utilisé, et bien sûr de l'ensoleillement qui varie légèrement d'une année à l'autre. Les systèmes modulaires les moins chers présentement, dont le fabricant annonce qu'ils satisferont de 30 à 50 pour cent des besoins d'une maison de dimension moyenne isolée, coûtent près de 5 000$ à l'achat. Si l'on ajoute le prix d'installation, le financement aux taux actuels d'intérêt revient à un coût annuel de quelque 600$.

Ce coût demeure présentement trop élevé. On doit toutefois s'attendre à un grand nombre d'innovations technologiques dans ce secteur, en ce qui a trait par exemple à la production en série des capteurs sophistiqués (les capteurs à vide, par exemple), au mode de stockage de la chaleur, et au fonctionnement des pompes à chaleur il pourrait s'ensuivre une nette réduction des prix, dans un avenir assez immédiat.

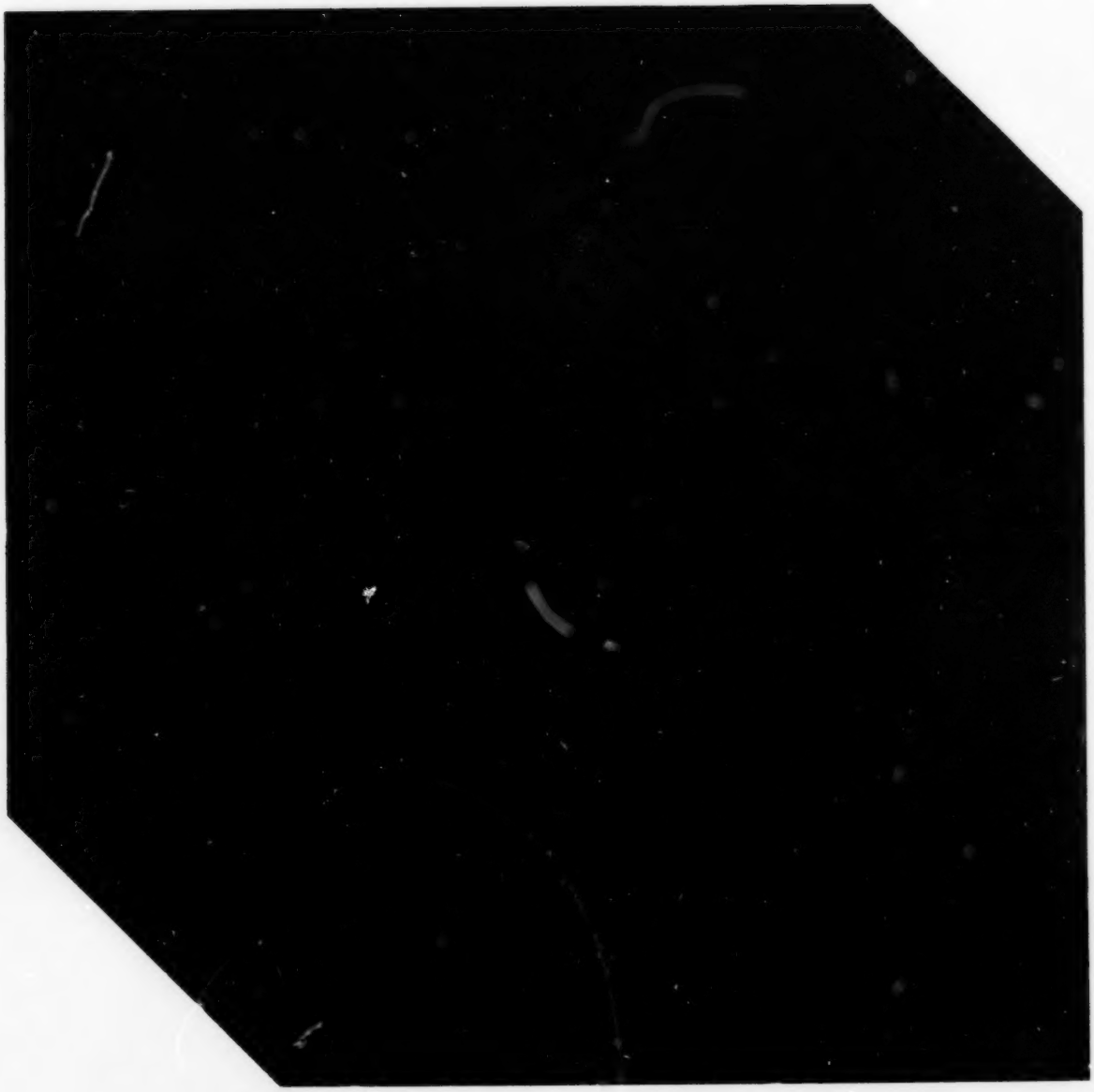


Les toits plats constituent un lieu privilégié pour l'installation de capteur solaire. La photo a été prise, rue Saint-Denis, à Montréal.

En attendant, la mise à contribution de l'énergie solaire de manière entièrement passive demeure quant à elle rentable dès aujourd'hui: exposition des fenêtres du côté sud; usage de matériaux qui stockent spontanément cette chaleur; meilleure conception des édifices pour assurer une circulation adéquate de l'air ainsi chauffé; etc. Dans le secteur des édifices commerciaux ou institutionnels en particulier, où le gaspillage de l'énergie est monnaie courante, de telles mesures pourraient parfois réduire des trois quarts les dépenses énergétiques actuelles!

Deuxième partie

Le pétrole vert



Les capteurs végétaux

Bien avant qu'il ne songe à construire des capteurs, pour mettre le rayonnement solaire à contribution dans son bilan énergétique, l'homme avait appris à se servir déjà abondamment des capteurs «naturels» répandus en quantité innombrable autour de lui: les feuilles des plantes vertes.

En effet, le pouvoir de photosynthèse (construction de matière à l'aide de la lumière) des végétaux et de certaines bactéries n'est en fin de compte qu'un mode très sophistiqué de stockage de l'énergie rayonnante du soleil. Les photons énergétiques qui frappent les pigments de chlorophylle végétale modifient en effet son équilibre électronique. Il s'ensuit une série de réactions chimiques liées les unes aux autres, jusqu'à ce que l'équilibre soit rétabli: l'énergie a alors été transférée, en bout de ligne, à une molécule baptisée «adénosine diphosphate», et lui a permis d'accaparer un atome de phosphore supplémentaire (on parle alors d'adénosine tri-phosphate, ou ATP).

Ailleurs dans la cellule, cette ATP retrouvera son état initial en modifiant à son tour l'équilibre chimique de diverses molécules organiques. De cette seconde chaîne de réactions, qui peut quant à elle s'effectuer en l'absence de lumière, s'ensuit la synthèse de toutes les variantes possibles de substances organiques (des sucres, des graisses, des acides aminés qui donneront en se regroupant toutes les protéines, etc.), à partir de molécules beaucoup plus simples, abondantes dans notre environnement: le gaz carbonique, l'eau et divers ions minéraux.

C'est donc l'énergie solaire, captée par la chlorophylle, transportée par le cycle ADP-ATP, et transférée ensuite sous forme de liaisons chimiques, qui alimente la fabrication de toute substance vivante. Les animaux herbivores, incapables de fixer eux-mêmes cette énergie solaire, utiliseront les richesses accumulées dans les végétaux comme source d'énergie et de matériel organique. Les carnivores feront de même, aux dépens des précédents. En outre, avec la découverte du feu, il y a des milliers d'années, l'homme a appris à libérer cette énergie emprisonnée dans les liens chimiques organiques d'une manière beaucoup plus brusque, pour produire une chaleur à haute température.

Pendant des millénaires, la combustion des végétaux fut pour l'homme sa seule source d'énergie «artificielle». Puis, il y a quelques siècles, il découvrait que la végétation qui avait recouvert la planète des millions d'années avant nous, et qui avait été depuis longtemps ensevelie sous la roche, n'avait pas perdu toute sa valeur énergétique. Et encore mieux, les liens chimiques ayant résisté à l'outrage des ans étaient les plus forts: il s'ensuivait donc la formation d'une énergie beaucoup plus concentrée. C'est ainsi que le charbon, puis le gaz et le pétrole, ont remplacé le bois dans notre économie.

Dans l'ensemble, le cycle végétal peut être comparé à nos divers capteurs modernes. La chlorophylle joue le rôle de capteur; l'ADP qui devient ATD, celui de caloporteur; et les molécules organiques formées par le transfert final de l'énergie peuvent être comparées à la roche, l'eau ou la paraffine qui, dans nos bassins de stockage, serviront à emmagasiner l'énergie du système.

Comparés ainsi à nos capteurs, les systèmes biologiques paraissent avoir un rendement dérisoire: entre 0,5 et 3 pour cent seulement de l'énergie qui les frappe est stockée dans la matière synthétisée. Comme une bonne part de l'énergie solaire est réfléchie ou dissipée lors de sa traversée de l'atmosphère, et qu'en outre la végétation est absente de bien des régions terrestres, c'est, en tout moins d'un demi-millième de l'énergie solaire totale qui sera ainsi emmagasinée dans la biomasse. C'est peu... mais c'est encore 10 fois plus que nous n'en avons besoin, présentement, pour couvrir tous nos besoins industriels. et même en ajoutant les exigences alimentaires et vestimentaires, nous n'arriverions guère à utiliser toute l'énergie ainsi stockée.

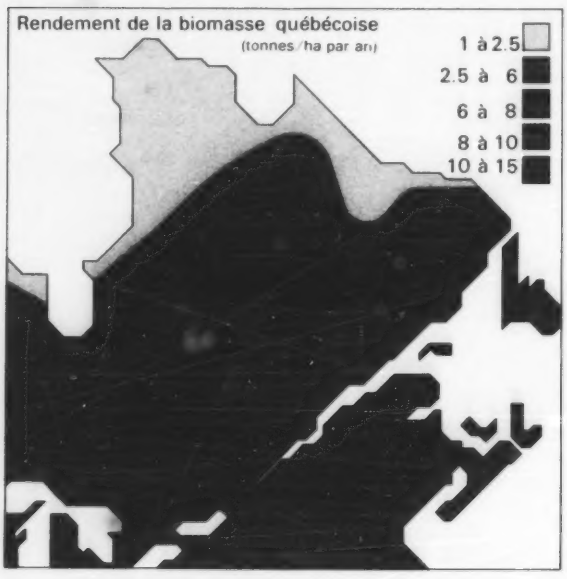
Mais les capteurs biologiques présentent surtout l'avantage d'être auto-reproducteurs, et d'exiger en conséquence une capitalisation moindre que tous nos capteurs de métal et de verre. Enfin, le mode de stockage de l'énergie par des liens chimiques en permet un transport facile, même sur de longues distances. En principe donc, notre économie pourrait fort bien... revenir au bois!

En principe seulement! Car fût-elle abondante, cette ressource énergétique n'en reste pas moins diffuse. Les principaux boisés québécois donnent une production de biomasse de l'ordre de 6 à 12 tonnes par hectare par année. Cela correspond à un approvisionnement énergétique de 0,3 à 0,6 watt par mètre carré. À la latitude de Montréal, par exemple, cela représente un potentiel 300 fois moins grand que celui du rayonnement solaire «libre».

Même en supposant un rendement de conversion en électricité de l'ordre de 30 pour cent, c'est 85 000 km carrés qu'il faudrait couvrir de forêts pour satisfaire à notre seule demande électrique actuelle. Et le bois récolté sur d'aussi vastes territoires devrait en outre être amené aux centrales, ce qui exigerait une dépense d'énergie additionnelle. Le projet serait peu réaliste, en tout cas.

Et pourtant, les surfaces boisées couvrent une superficie bien plus vaste au Québec! Si nos forêts ne sont pas les plus productives au monde, loin de là, le Québec se situe tout de même parmi les régions les mieux nanties en biomasse par unité de population. En somme, si d'autres nations ont peut-être, face au rayonnement solaire direct, une position plus favorable que la nôtre, ce n'est pas le cas face au «pétrole vert». Dans ce domaine, le leadership devrait nous appartenir.

La plupart des boisés québécois donnent une production de biomasse de l'ordre de 6 à 12 tonnes par hectare par année, ce qui correspond à un approvisionnement énergétique «stocké» de 0,3 à 0,6 watt par mètre carré.



Les avenues technologiques

Un grand nombre d'approches techniques s'offrent à nous pour «re-découvrir» cette énergie végétale. La plus évidente est sans doute la combustion directe du bois, en billes ou en copeaux, dans des poêles, des fournaises ou des chaufferies industrielles. On pense par exemple à l'utilisation des résidus des moulins et scieries, ou des déchets ligneux abandonnés présentement en forêt. Il y a là une ressource très considérable, que nous pourrions recueillir moyennant des investissements assez faibles, l'infrastructure industrielle étant déjà en place.

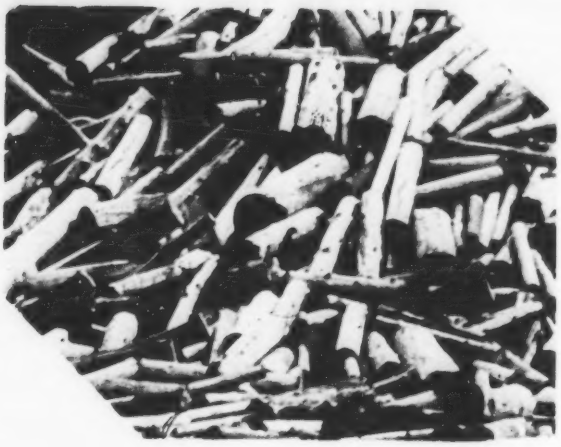
La seconde grande catégorie de procédés d'utilisation de la biomasse repose sur sa gazéification, qui donne un combustible à faible ou moyenne teneur énergétique. Plusieurs procédés de gazéification sont maintenant bien connus, dont certains ont l'avantage de reposer sur l'action de bactéries et d'être en conséquence peu énergivores.

Enfin, comme notre société a jusqu'ici privilégié grandement le pétrole à cause des aspects utilitaires liés à son état liquide, les procédés physico-chimiques qui permettent de passer des gaz de bois à des formes liquides de combustibles ligneux (le méthanol et les autres alcools de bois) pourraient, malgré leur forte dépense énergétique, se révéler fort utiles pour alléger un jour notre importation de pétrole.

Tous ces procédés présentent aussi un autre avantage: ils peuvent fort bien porter non pas sur la biomasse «brute» de nos forêts, mais sur la biomasse déjà «transformée» par l'industrie et la consommation, c'est-à-dire les déchets. L'hygiène urbaine veut en effet que ceux-ci soient déjà collectés et acheminés en des sites centralisés, où leur utilisation comme source d'énergie paraît alors devenir facile.

Deux autres avenues, plus lointaines, méritent aussi d'être abordées. La première, c'est l'asservissement direct de certains processus biologiques pour répondre à notre soif d'énergie. Il existe en effet des algues et des bactéries capables de produire du méthane à partir de matières premières plus simples, ou d'autres qui peuvent agir sur des roches carbonatées pour produire des gaz combustibles à faible teneur énergétique. Pourrait-on concevoir des «cultures de gaz»? De même, certaines espèces végétales produisent une sève très riche en hydrocarbures, et des «fermes à pétrole» ont déjà été installées en certains points du globe.

La seconde voie d'avenir repose sur la conception par l'homme de procédés industriels de photosynthèse «artificielle». Il s'agirait d'usines solaires de combustibles, dont les premières en liste seraient sans doute les usines à hydrogène. Très abondant sur terre, l'hydrogène séparé de l'eau prend une valeur énergétique comparable à celle du gaz naturel. Et sa synthèse est plus facile à réaliser que celle des composés organiques complexes dont nous gratifient les plantes vertes.



Chapitre 5

Du bois à brûler

Au Québec, les divers exploitants forestiers effectuent annuellement des coupes totales de l'ordre de 16 millions de tonnes de bois. De ces coupes, 9 millions de tonnes servent à la production de pâtes et papiers, et 7 millions de tonnes à la production de bois d'oeuvre. » Il est difficile d'évaluer le tonnage exact des déchets industriels non utilisés, mais on l'estime à 3 millions de tonnes, principalement rejetées par les usines de pâte aux sulfites et par les scieries. 1,3 millions de tonnes seraient par contre déjà utilisées comme source de chaleur, alors que toutes les usines de papier utilisant le procédé kraft, par exemple, brûlent déjà leurs « liqueurs » de rejet pour la production de vapeur.

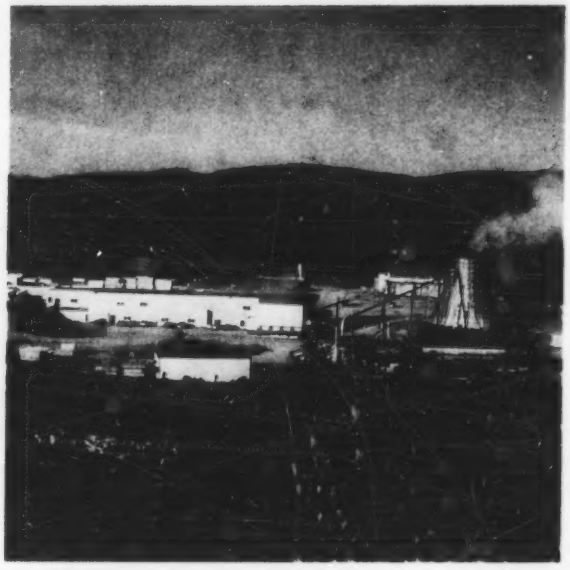
Cette autoconsommation par les compagnies papetières de leurs propres résidus ligneux n'est que rarement comptabilisée dans le bilan énergétique d'ensemble de notre société, parce qu'elle ne fait l'objet d'aucune transaction entre fournisseur et consommateur d'énergie. Pourtant, on estime que si on tenait compte de ce volume de bois brûlé, ce dernier compterait alors pour près de 4,5 pour cent de la consommation totale d'énergie au Québec.

a) au secours de l'industrie forestière

Compte tenu du fait que chaque tonne de bois sec peut fournir entre 15 et 18 millions de BTU, soit l'équivalent de 3 barils de pétrole environ, les 7 à 15 millions de tonnes présentement abandonnées aux abords des usines, outre qu'elles constituent une pollution déplorable, représentent la perte pure et simple de 20 à 45 millions de barils de pétrole brut chaque année. De nombreuses usines envisagent donc présentement de se doter de bouilloires utilisant ces copeaux, ou les résidus de pâte dans le cas des moulins à papier, alors que bon nombre d'autres l'ont déjà fait. Ainsi, il existait déjà, en 1978, plus d'une vingtaine de moulins québécois possédant leur bouilloire à écorce.

Dans ce domaine, nous ne sommes donc pas dans un secteur d'avenir plus ou moins lointain, mais bien au cœur même de l'actualité. Le transfert progressif des achats de pétrole et de gaz par l'industrie forestière québécoise, au profit de l'utilisation de la biomasse, est déjà compétitif, d'autant plus que l'approvisionnement en déchets de bois se fait sur place, à un coût minime en conséquence. Tout n'est donc plus qu'une question de disponibilités financières pour acheter l'équipement de rechange. La mise en place récente de programmes gouvernementaux d'aide aux entreprises forestières et l'effort visant à favoriser le recours à la biomasse comme ressource énergétique ne peuvent désormais qu'accélérer grandement ce transfert.

Selon les estimés gouvernementaux, cette première étape (l'utilisation intensive des déchets générés sur le site industriel) devrait permettre de réduire de 60 pour cent la consommation actuelle de pétrole et de gaz des industries forestières. C'est loin d'être négligeable, ce secteur industriel étant aujourd'hui encore le premier consommateur d'énergie chez nous. Mais à plus long terme, les planificateurs envisagent non seulement l'utilisation des déchets d'usine, mais aussi des résidus présentement abandonnés en forêt, lors de l'émondage des billes, et plus généralement encore, de l'ensemble des espèces ligneuses abandonnées sur place, dans les opérations de



Un revenu d'appoint pour les industries forestières québécoises?

coupe sélective, parce qu'elles sont dépourvues de valeur comme source de pâte ou de bois d'œuvre. Ici, les estimés varient énormément, allant de 20 pour cent de la biomasse des concessions forestières qui serait laissée sur place, jusqu'à 60 pour cent selon certains. Dans tous les cas, la valeur énergétique de ce bois abandonné est considérable. Contrairement aux déchets d'usine, toutefois, sa récupération implique des coûts additionnels, surtout au chapitre du transport vers l'usine. À moyen ou à long terme avec la hausse du prix des produits pétroliers surtout, l'exploitation de cette ressource pourrait devenir rentable.

Notons qu'une partie de cette récolte additionnelle pourrait alors être brûlée sur place par les usines, assurant ainsi l'autonomie complète de ce secteur industriel face aux fournisseurs d'énergie fossile. En outre, la partie excédentaire de cette ressource s'ajouterait aux exportations nettes de ces compagnies, soit sous forme de bois de chauffage, de combustibles synthétiques plus raffinés (gaz ou alcools de bois), ou même d'électricité. Il existe déjà en effet à Burlington, au Vermont, une centrale électrique pilote de 10 MW, alimentée à 70 pour cent par les copeaux produits dans les scieries environnantes. Mis à part le fait qu'un tel développement stimulerait la création d'emplois dans les régions périphériques québécoises les plus durement touchées par le chômage, cela contribuerait à diversifier la production des sociétés forestières et à améliorer leur situation financière.

À plus long terme encore, l'exploitation pour des fins exclusivement énergétiques de vastes secteurs forestiers présentement délaissés par les industries papetières peut être envisagée. La rentabilisation de telles exploitations paraît toutefois plus difficile, puisque les coûts ne sont guère partagés entre plusieurs productions complémentaires, et que la rentabilité suppose donc une très forte production de biomasse énergétique dans un espace plutôt restreint. On a d'abord cru que de telles «plantations énergétiques» étaient impossibles sous nos climats, mais les chercheurs ontariens de Maple Station, à Edwardsburg, ont développé une colonie de peupliers à croissance très rapide, qui atteignent une bonne taille en trois ans à peine, et produisent une moyenne de quelque 20 tonnes à l'hectare. Un boisé carré de 70 kilomètres de côté produirait alors environ 7 à 8 millions de tonnes de bois par année, mais il faudra attendre les résultats de l'expérience pilote ontarienne pour mesurer son potentiel réel.

b) le potentiel du chauffage domestique au bois

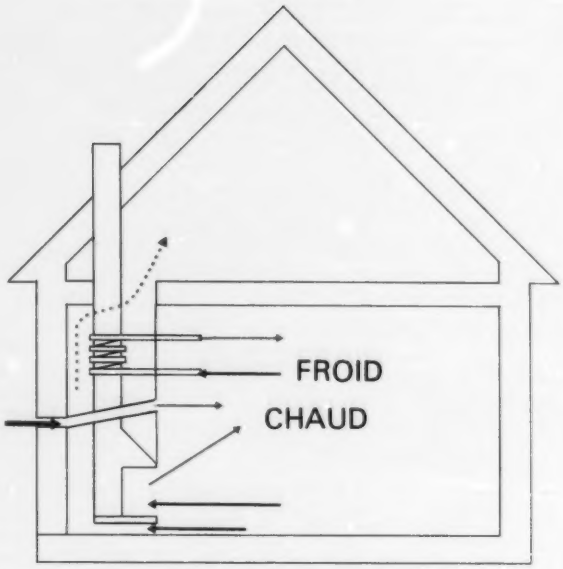
Malgré le caractère apparemment anachronique du chauffage au bois, on estime encore à quelque 45 000 le nombre de foyers québécois dont le bois est la source principale d'énergie primaire. Or, loin de régresser, ce chiffre pourrait connaître une certaine croissance, avec le développement progressif de l'énergie solaire. En effet, les inconvénients majeurs de l'utilisation du bois comme combustible domestique (le grand volume de stockage nécessaire, le problème de l'alimentation manuelle de la fournaise et l'augmentation du volume des déchets accumulés dans la cheminée) peuvent être compensés, lorsqu'il ne s'agit que d'un chauffage d'appoint, par la relative autonomie que le bois procure à son utilisateur, face aux fournisseurs de ressources conventionnelles.

Toutefois, il convient de mentionner que cet avantage n'est vrai que pour les résidences situées proches de boisés, et si le consommateur accepte d'acheter du bois «debout» ou en billes, et de le couper lui-même. Au contraire, le consommateur urbain qui souhaiterait recevoir à domicile un bois déjà préparé découvrira qu'à quantité d'énergie égale, le bois est probablement aussi cher que l'huile ou le gaz. et c'est normal: le bois est alors coupé à la tronçonneuse, à des kilomètres de son point de livraison, et acheminé par de petits camions qui dépensent presque autant d'énergie dans ce processus qu'ils n'en livrent aux consommateurs!

Aussi, il est fort peu probable que, malgré une certaine progression, encouragée d'ailleurs par la levée récente de certaines taxes fédérales sur le matériel de chauffage au bois, ce dernier prenne une place importante au niveau du chauffage résidentiel. Si on doublait brusquement, par exemple, le nombre des maisons utilisant ce mode de chauffage, cela ne diminuerait pourtant que de 5 millièmes notre consommation d'énergies conventionnelles. Il faut toutefois remarquer que, même si ce chiffre peut paraître négligeable, il demeurerait un allègement important de notre dépendance énergétique. Surtout si le recours au bois sert de chauffage d'appoint de maisons solaires, et empêche ainsi ces dernières de ne dépendre du réseau électrique qu'aux heures les plus froides de l'année, qui sont aussi celles où la demande d'électricité est la plus difficile à rencontrer.

Mentionnons enfin que s'il existe d'excellentes chaufferies au bois, avec leur propre contrôle thermostatique, et même des chaufferies hybrides, à l'huile et au bois, à prix très abordable, et que la technologie des poêles chauffant par rayonnement direct est assez bien connue, le foyer domestique ne peut que rarement être considéré comme un mode de chauffage.

Le principe même de ces foyers ouverts repose en effet sur la création, dans la cheminée, d'une colonne d'air chaud ascendant qui «tire» vers l'extérieur l'air de la maison, fournissant ainsi l'oxygène nécessaire à une flamme très large, et évacuant du même coup les cendres et les vapeurs toxiques. Même si l'énergie radiante de la flamme peut chauffer suffisamment l'air de la pièce, le courant d'air créé de l'intérieur vers l'extérieur résulte en un appel d'air en provenance de l'extérieur, par l'ensemble des ouvertures de la maison: les autres pièces risquent de se refroidir considérablement! En outre, après la mort des dernières flammes, la trappe de la cheminée doit être maintenue ouverte pour assurer l'évacuation des dernières vapeurs et cendres, contribuant à accroître encore le déficit énergétique lié à un tel foyer.



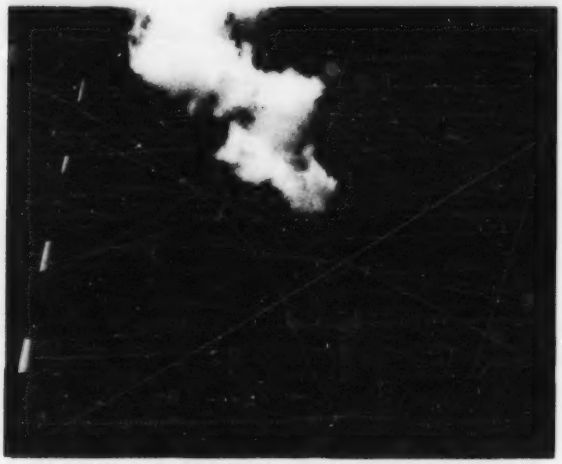
Trois trucs permettant à un foyer décoratif de n'être pas une «trappe à froid»: 1) Une colonne d'air est créée derrière l'antre avec prise d'air frais au niveau du plancher, et libération d'air chaud au plafond ou à l'étage supérieur; 2) Comme le foyer allumé crée un appel d'air dans la maison, une ouverture est pratiquée immédiatement derrière le foyer, de sorte que l'air extérieur y soit pré-chauffé avant de pénétrer dans la pièce; 3) la chaleur résiduelle de la cheminée peut être utilisée en partie pour le pré-chauffage de l'eau des calorifères ou de l'eau chaude sanitaire.

Il y a bien sûr certaines exceptions. Dans certains cas, l'installateur du foyer prévoit une prise d'air extérieure dont le conduit longe l'antre chauffant, de sorte que cet air est «pré-chauffé» en pénétrant dans la maison. Dans d'autres cas, on fera circuler de l'air ou de l'eau le long des parois de l'antre, et même autour de la cheminée afin de drainer le plus de calories possible de cet air chaud qui s'échapperait normalement. À moins que de tels dispositifs ne soient prévus (ce qui accroît le coût d'installation de ces foyers), le recours à un foyer ouvert n'est guère une solution à un problème de chauffage, bien au contraire.

c) incinérateurs municipaux et chauffage collectif

Depuis 1974, l'incinérateur de déchets de la Communauté urbaine de Québec produit de la vapeur qui est vendue à une entreprise papetière locale. En principe, malgré diverses technicalités qui ont empêché le projet de se matérialiser, rien n'aurait interdit qu'il en soit de même pour celui de la ville de Montréal, qu'on avait conçu pour fournir du chauffage aux résidences avoisinantes.

Car ce qui est vrai des déchets ligneux l'est aussi des déchets urbains. Ils constituent une formidable réserve d'énergie, relativement concentrée en divers sites de dépôts. Bien qu'il existe en certains endroits des projets de recyclage plus ou moins total de ces déchets, ce



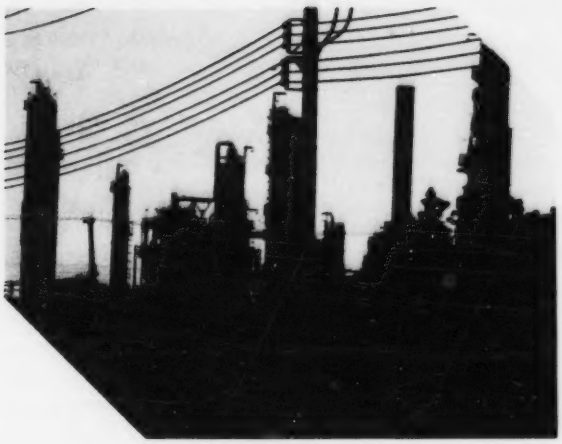
L'incinérateur de Montréal... De la vapeur qui se perd.

processus de récupération semble pour l'instant impossible à rentabiliser dans le cas des résidus organiques, qui constituent en fait l'essentiel de nos déchets domestiques. Leur usage énergétique semble donc aller de soi. Une des utilisations finales de cette chaleur qui a été souvent envisagée est le chauffage domestique collectif. Mais ce dernier est saisonnier, et il suppose une concentration assez importante de locaux de résidence, dans un rayon proche de l'incinérateur: or il est douteux qu'un grand nombre de familles acceptent avec plaisir l'environnement peu esthétique, parfois pollué, toujours caractérisé par une intense circulation des camions de cueillette des détritus, que constituent les abords de telles chaufferies. Ces inconvénients sont par contre marginaux lorsque l'incinérateur est situé dans un parc industriel. Et compte tenu des coûts qu'aurait nécessité de toute façon la manutention des déchets urbains et leur enfouissement éventuel, la vapeur ainsi produite est toujours concurrentielle, pour les utilisateurs potentiels.

d) le charbon brun

La tourbe, produit de la dégradation biochimique de la biomasse, n'est guère une ressource renouvelable, puisque son cycle de renouvellement demande jusqu'à 7 000 ans. On l'associerait donc à plus juste titre au pétrole ou au charbon, au rang des ressources fossiles. Il convient d'en parler ici toutefois, parce que sa capacité thermique, supérieure à celle du bois, et sa composition chimique font qu'elle se prête idéalement à tous les procédés physico-chimiques envisagés pour récupérer l'énergie de la biomasse.

Or, si le Québec n'est pas riche en hydrocarbures, il est au contraire particulièrement favorisé du côté de la tourbe. Les estimés sont fort imprécis quant au volume total, mais les tourbières pourraient nous fournir assez de combustible, selon les estimés les plus optimistes, pour remplacer tout notre pétrole pour les 28 prochaines années. Moins facilement exploitables que les gisements pétroliers, moins denses en énergie que les sites carbonifères, les tourbières constituent malgré tout une ressource de rechange de premier ordre. Mentionnons simplement qu'il y a, dans certains pays d'Europe, et plus particulièrement en URSS et en Islande, des centrales électriques alimentées uniquement à partir de telles tourbières. La ressemblance entre les propriétés de la tourbe et celles de la biomasse permettent en outre de concevoir des systèmes de production d'énergie (électricité ou combustibles liquides et gazeux) alimentés en partie avec de la tourbe, et en partie avec des déchets organiques, comme les déchets urbains ou agricoles par exemple.



Chapitre 6

La biomasse à transformer

Si l'usage du bois en combustion directe paraît prometteur pour les usines possédant de grandes quantités de résidus ligneux à brûler, le coût du transport du bois entier, le volume de stockage qu'il exige, et les manutentions supplémentaires qu'implique l'alimentation d'une chaufferie au bois limitent grandement son potentiel d'utilisation, sous sa forme brute, dans les autres secteurs industriels. Aussi, de nombreux procédés physiques ou chimiques pouvant transformer cette ressource inexploitée en combustible de forme plus pratique ont été envisagés, et certains sont même fort bien connus depuis très longtemps.

Un certain nombre de points doivent toutefois être clairement précisés au départ. Tous ces procédés nécessitent en eux-mêmes une certaine dépense d'énergie. En outre, en «concentrant» l'énergie contenue dans le bois sous une forme plus pratique, ils débarrassent du même coup la ressource ligneuse de ses liens chimiques les moins énergétiques, et entraînent en conséquence une baisse nette du potentiel de récupération. Selon les procédés utilisés et le produit final obtenu, cette dévalorisation énergétique peut aller de 30 pour cent environ jusqu'à 60 ou 70 pour cent dans certains cas, en tenant compte de l'énergie engouffrée dans le procédé industriel.

En somme, si fascinante que soit la perspective de fabriquer notre essence ou notre gaz domestique à partir de nos ressources forestières, et de ne plus dépendre en conséquence d'approvisionnements étrangers, il faudra garder à l'esprit qu'on bénéficierait de quantités d'énergie beaucoup plus grandes, et à un coût moindre, si on parvenait tout simplement à utiliser le bois sous forme brute.

Ceci dit, comme nos automobiles et nos avions ne sont guère concevables avec un réservoir rempli de quelques tonnes de copeaux de bois, les procédés de transformation de cette ressource prennent une importance certaine, malgré leur faible rendement. En somme, ce qui ne semble guère rentable sur le strict plan de la comptabilité énergétique le devient lorsque l'on réalise que l'on doit toujours consentir des pertes d'énergie, lorsqu'on veut augmenter la concentration (ou le «grade») d'une ressource.

a) Pyrolyse et gazéification

Essentiellement, la combustion du bois ou de toute autre matière organique est une réaction chimique de décomposition des longues chaînes moléculaires, accompagnée d'oxydation, et donne comme produit final du gaz carbonique (CO_2) et de la vapeur d'eau (H_2O). Cette réaction, déclenchée par la chaleur, en dégage en retour une quantité encore plus grande. Toutefois, si la décomposition amorcée par la chaleur est faite en l'absence complète d'oxygène, les liens chimiques les plus faibles seront brisés, mais faute d'oxydation des fragments, ceux-ci se réorganiseront en produits organiques beaucoup plus simples, très riches en énergie. C'est ce type de décomposition sans oxygène que l'on désigne en général sous le vocable «pyrolyse».

Selon les matières premières utilisées, la présence d'azote ou de catalyseurs, et les conditions de la réaction (température de déclenchement, pression), la pyrolyse donnera une grande variété de combustibles solides (charbons de bois), liquides ou gazeux. Dans la majorité des dispositifs opérationnels d'aujourd'hui, le combustible introduit dans la réaction sera d'abord soumis à un

processus de combustion «ordinaire». C'est la chaleur ainsi dégagée qui sera utilisée, dans une autre section du «réacteur», pour la poursuite de la réaction, en l'absence d'oxygène cette fois.

Tous les sous-produits de la réaction ont une vocation importante, comme combustibles concentrés. Mais c'est sans conteste le gaz qui présente sur ce plan l'éventail économique le plus large. Quoique d'assez faible capacité thermique, en général, par rapport au gaz naturel, il peut être par la suite revalorisé pour donner de l'excellent gaz synthétique, ou encore pour servir de matière première de produits organiques liquides comme l'éthanol ou le méthanol, dont la capacité thermique se compare à celle de l'essence.

Dans certains cas, il devient donc avantageux d'accélérer encore la gazéification des composés organiques, moyennant toutefois une perte énergétique encore plus grande. Cet objectif est obtenu en accroissant la température de la réaction et en fournissant de l'oxygène, quoique de manière contrôlée. Contrairement à la pyrolyse, la décomposition sans oxygène fait donc place à un processus de combustion incomplète. En dosant savamment les quantités d'oxygène utilisées, on peut obtenir des gaz plus riches en hydrogène, en monoxyde de carbone et en fragments organiques à haute teneur énergétique comme le méthane, dont la transformation subséquente en gaz de synthèse puis en méthanol sera facilitée. D'une manière générale, on peut considérer que cette gazéification n'est qu'une variante de la pyrolyse, alors que certains auteurs n'insistent que sur la différence de température entre les deux réactions, parlant de gazéification pour tous les procédés à plus de 300°C.

En tenant compte du coût des installations nécessaires à la pyrolyse et de la perte de rendement qui accompagne ce procédé, un pyrolyseur ne pourra se rentabiliser, à court terme du moins, que dans le cas de réacteurs alimentés par de grandes quantités de résidus organiques. Cela inclut certes bon nombre d'usines forestières, mais à la condition qu'elles pratiquent de la coupe additionnelle destinée à ces réacteurs. L'utilisation seule des déchets actuels produirait un trop faible volume de gaz pour justifier les investissements requis pour sa revalorisation et sa transformation éventuelle en combustibles liquides. Or sans eux, seules les usines disposant à proximité d'un réseau d'utilisation du gaz produit pourraient rentabiliser leur pyrolyseur. Par contre, les grandes tourbières, les réseaux de collecte des déchets urbains des grandes villes (essentiellement Montréal et Québec) ainsi que d'éventuelles plantations énergétiques pourraient fort bien assurer une production rentable de tels combustibles de pyrolyse, là où les usages directs de la chaleur produite par combustion s'avèrent limités.

b) la production de méthanol

Plusieurs procédés chimiques ou physiques sont présentement au point pour traiter ces gaz de pyrolyse, de rendement énergétique faible ou moyen, pour en faire des produits utilisables comme substituts du gaz naturel, même dans les applications exigeant un très haut rendement, ou encore comme substitut de l'essence ou des autres produits pétroliers.

Parmi ces procédés, le plus connu est le traitement à la vapeur («steam reforming»), déjà largement employé dans le traitement des gaz naturels «dégradés», pour la production de méthanol. Malheureusement, le procédé est fortement endothermique (il requiert beaucoup de chaleur), et certaines études préliminaires font même douter qu'il ne devienne jamais rentable dans le cas de gaz de pyrolyse à trop faible rendement, comme ceux dont on dispose présentement à la sortie des gazéificateurs commerciaux. La mise en place sur une grande échelle d'usines de méthanol ou d'autres alcools énergétiques à partir des résidus organiques, suppose donc qu'on perfectionne le procédé de gazéification préalable et que l'on conçoive des dispositifs de traitement à la vapeur très économes de leur énergie. Il y a donc place pour l'innovation technologique.

En supposant même que l'on dispose, comme matière première, d'un gaz très riche en monoxyde de carbone et en hydrogène ($CO + 2\ H_2 \longrightarrow CH_3OH$), la question économique n'en serait pas réglée pour autant: diverses études tendent à établir alors entre 0,65$ et 0,86$ le prix du gallon de méthanol produit et distribué à la pompe, soit entre 1,55$ et 1,75$ pour l'équivalent énergétique d'un gallon d'essence. À priori, ça n'apparaît guère beaucoup plus cher que le gallon d'essence actuel, mais il faut réaliser que sur le prix de plus d'un dollar qu'on paie aujourd'hui, la part du lion va aux différentes taxes fédérales et provinciales, et aux redevances (royautés) à l'État producteur. Ces évaluations proviennent d'une étude de faisabilité, commandée par le Gouvernement du Québec, concernant la possibilité de construire une usine devant produire 230 millions de litres de méthanol par an. Les coûts mentionnés dépendent de la grosseur de l'usine projetée et tiennent également compte de la collecte du bois et résidus de bois, du stockage et de la distribution du méthanol jusqu'aux pompes. L'usine pourrait être construite vers 1985.

c) les autres procédés de revalorisation

Quoiqu'il soit le plus «conventionnel» des procédés de revalorisation des gaz à faible teneur énergétique, le traitement à la vapeur n'est pas le seul procédé connu ou envisagé. Dans le cas de l'hydro-gazéification, par exemple, les gaz résultant de la pyrolyse, déjà riches en hydrogène libre, sont traités pour augmenter encore la part de cet élément dans le mélange. Ce gaz enrichi est alors mis en présence de résidus organiques non traités, dans des conditions de pression et de température très élevées, conduisant à l'obtention d'un gaz pyrolytique à très haute teneur en méthane, dont la valeur énergétique n'est pas loin de celle des gaz naturels synthétiques. Si la fabrication du gaz pyrolytique initial, son enrichissement subséquent en hydrogène, et sa réintroduction dans un four à haute pression demandent une grande quantité d'énergie, la réaction d'hydro-gazéification est quant à elle fortement exothermique, permettant de traiter en fin de compte l'ensemble du stock de biomasse sans addition

d'énergie, une fois le cycle amorcé. Il existe présentement une usine pilote utilisant ce processus avec succès, à Columbus, aux États-Unis.

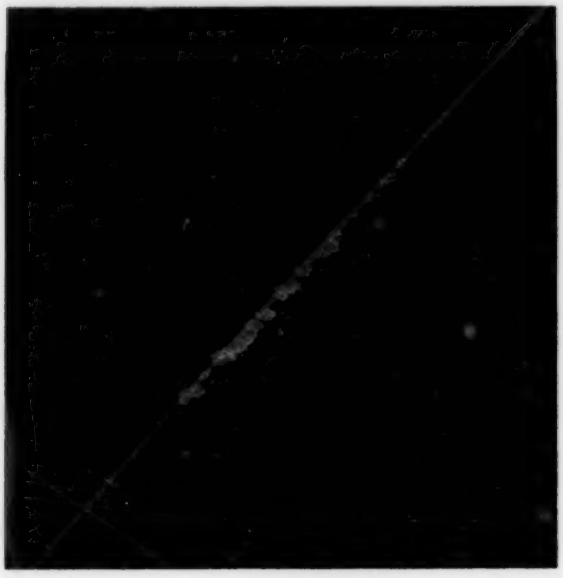
Une autre méthode de transformation de la biomasse utilise à la fois le monoxyde de carbone, qui peut être produit lors de la combustion incomplète, et les résidus riches en cellulose, à des températures de quelque 300°C et des pressions allant de 75 à 350 atmosphères. La réaction de liquéfaction (aussi appelée hydrogénation) qui s'ensuit donne directement une huile liquide dont la consistance rappelle l'huile No 6, quoique avec une valeur thermique moindre. Là aussi, le procédé, mis au point par le bureau des mines américain, est en train d'être expérimenté dans la ville d'Albany, en Oregon.

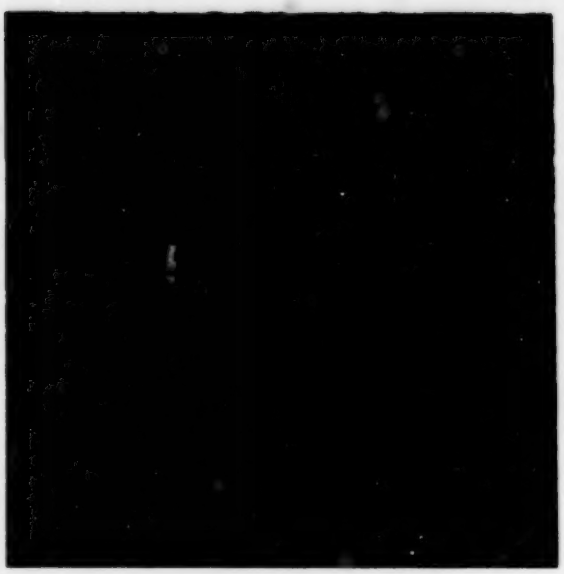
d) le traitement biologique de la biomasse

La plupart de ces procédés nécessitent toutefois de fortes quantités d'énergie, et une technologie qui n'a rien à voir en fait avec la vision d'une «société douce». En outre, les installations étant nécessairement centralisées, une bonne partie de la biomasse ne pourra jamais se prêter à ce type d'exploitation, sa manutention et son acheminement en un site unique étant trop onéreux. C'est dans cette optique qu'on s'est beaucoup intéressé aux procédés biologiques de traitement des résidus organiques.

Le plus connu de ces procédés est la fermentation des déchets, c'est-à-dire leur digestion en absence d'air, grâce à l'action combinée de diverses bactéries. Le procédé s'effectue à une température modérée (35°C) et demandera un délai de fermentation variant entre 15 et 30 jours, selon les volumes et les conditions d'alimentation du digesteur. Comme la lignine du bois empêche le développement de cette activité bactérienne, les résidus ligneux ne pourront être utilisés qu'après l'extraction de cette composante. Les résidus de la fabrication de la pâte à papier, par contre, constituent, avec un léger supplément de fumier animal, le mélange biodigestif le plus productif que l'on connaisse.

Les déchets agricoles: une source d'énergie appréciable.





Le produit de la fermentation est un gaz composé environ de 70 pour cent de méthane et de 30 pour cent de gaz carbonique. Ce mélange offre un pouvoir calorifique assez faible; mais un procédé assez simple de lavage à l'eau permet d'extraire une bonne partie du gaz carbonique et d'augmenter la teneur énergétique du gaz de fermentation à un niveau voisin de celui du gaz naturel commercialisé.

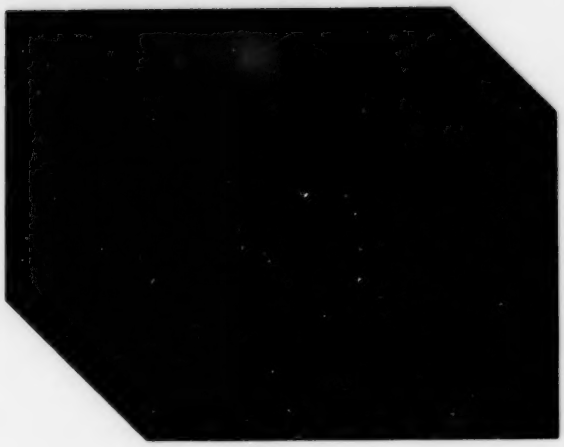
Techniquement, le méthane produit peut lui aussi être traité pour donner divers combustibles liquides, mais la conception décentralisée des digesteurs biologiques incite plutôt à destiner ce gaz aux usages locaux: alimentation en gaz d'usines sises à proximité des bassins de fermentation des résidus papetiers; alimentation de certains appareils sur le site même des fermes; etc.

Quoique ce procédé nécessite en général des équipements assez volumineux pour une production énergétique plutôt faible (il existe par exemple au Vermont, non loin de la frontière québécoise, un petit digesteur traitant 36 tonnes de fumier par année, soit un contenu de quelque 3 tonnes continuellement, et qui produit 6 mètres cubes de gaz par jour: c'est l'équivalent énergétique de 3,4 litres d'essence à peine!), les investissements requis sont aussi rentabilisés par les aspects secondaires du procédé: le fumier ainsi traité devient un engrais de tout premier ordre, très riche en azote, et sans odeurs, et le procédé de fermentation des eaux industrielles usées constitue un excellent mode de dépollution de celles-ci. Au Québec, déjà près d'une vingtaine d'usines d'épuration des eaux ont adopté ce procédé de fermentation... mais sans se soucier de récolter les quantités de méthane produites ainsi, ni les boues fertilisantes dont on pourrait tirer parti. Des recherches intensives sont en marche présentement aux États-Unis, au Canada et au Québec pour améliorer le rendement de cette production de méthane et de boues, dans les procédés d'épuration des eaux, pour justifier une exploitation commerciale de ces sous-produits. La rentabilisation apparaîtrait alors possible à court terme.

L'hydrolyse des produits ligneux, c'est-à-dire la transformation acide ou enzymatique de la cellulose en sucres, est aussi un procédé fort bien connu. Or, les sucres ainsi

produits, outre leur valeur alimentaire éventuelle, peuvent aussi être fermentés pour produire de l'éthanol et divers alcools de bois, ou encore introduits à leur tour dans un cycle de digestion anaérobique pour produire du méthane. Quoique le bas prix des hydrocarbures n'ait pas justifié, autrefois, que l'on développe sérieusement ces procédés, le Brésil s'est lancé depuis quelques années dans un programme intensif de fermentation du sucre de canne pour produire de l'éthanol qui est mélangé à l'essence. En faible proportion (2 à 8 pour cent), un tel supplément à l'essence n'exige pratiquement aucune modification mécanique, et la qualité du combustible est même supérieure à celle de l'essence pure (meilleur indice d'octane, meilleur rendement de combustion). L'objectif du programme brésilien est d'atteindre une production autochtone de 20 pour cent de la consommation nationale d'essence pour automobiles.

Nous n'avons certes pas de canne à sucre. Mais le Québec produit entre autres beaucoup de maïs, dont on pourrait utiliser les abondants résidus cellulosés comme source de sucre, après un procédé d'hydrolyse. Trop peu d'études ont porté jusqu'ici sur cette source de combustibles synthétiques pour qu'on en mesure le coût éventuel et le volume de production potentielle au Québec. Les incertitudes portent notamment sur la manutention des résidus agricoles, sur le coût de l'hydrolyse à grande échelle, sur l'insertion de l'éthanol dans notre réseau de distribution d'essence, etc. Mais à long terme, on pourrait envisager l'installation, au Québec même, de vastes plantations de maïs servant à la fois à la production de provendes animales et de sucres de synthèse destinés à une usine de combustible. Ajoutons, enfin, que l'éthanol (C_2H_5OH) est un composé organique plus complexe que la molécule de méthanol (CH_3OH); le plus grand nombre d'atomes de carbone dans la chaîne fait de l'éthanol une matière première aussi intéressante pour la synthèse organique, par l'industrie chimique, que pour la production de combustible.



Chapitre 7

La photosynthèse non-végétale et la production intensive de combustibles

Le rendement global de la photosynthèse végétale, rappelons-le, est plutôt faible: entre 0,5 et 3 pour cent, sous les meilleurs climats! Cela limite grandement le potentiel de toutes les techniques mentionnées précédemment, en ce sens que des productions abondantes nécessiteront toujours de vastes territoires de récolte, et par conséquent des coûts élevés.

C'est dans cette optique que l'on a consacré de nombreux efforts de recherche en vue du développement d'espèces végétales à très haut rendement, seul moyen immédiat de concentrer un peu plus cette énergie encore diffuse. Mais d'autres voies ont aussi été envisagées.

a) Les algues et les bactéries

La première de ces avenues de recherche repose sur l'exploitation intensive des micro-organismes qui partagent avec les végétaux terrestres le privilège de la photosynthèse: les algues et les bactéries. À cause de la nature de ces micro-organismes, il est théoriquement possible d'entraîner un développement beaucoup plus concentré de la biomasse totale, pourvu qu'on leur fournisse un milieu de culture suffisamment riche.

Ainsi, moyennant un éclairage abondant (plus de 200 watts par mètre carré), l'algue verte Chlorella donnera une production étonnante de 3,5 kilogrammes par mètre cube en 24 heures à peine. Cela équivaut à un rythme de près de 17 000 BTU par jour, par mètre cube de bassin, c'est-à-dire que la quasi totalité de l'énergie radiante est transformée en énergie biochimique. Avec une telle production, il suffirait de couvrir un territoire de 25 kilomètres de côté d'un bassin d'un mètre de profond pour compenser la totalité de la consommation canadienne de pétrole! À première vue, il y a de quoi repousser à jamais le spectre d'une crise de l'énergie...

Toutefois, cette énergie n'est pas gratuite, loin de là. Pour soutenir un tel rythme de production, il faudra fournir 0,1 gramme d'azote par gramme d'algue, suit un coût d'environ 4,5 cents le kilogramme de biomasse. N'oublions pas toutefois que le coût extrêmement élevé du pétrole, qui a fait trembler le monde occidental sur ses assises, s'élève à environ... 8,5 cents le kilogramme! Cela ne nous laisse guère de chance de rentabiliser une production d'algues qui nécessite en outre du carbone, du phosphore, divers autres minéraux, un éclairage intense, une infrastructure technique, et des procédés de transformation subséquents qui risquent de coûter cher et d'en amoindrir nettement la valeur énergétique. D'autant plus que l'azote ne peut être fourni sous forme gazeuse: en ayant recours aux engrais chimiques pour fournir cet azote, on se condamne à voir ses prix s'accroître au même rythme que celui des ressources énergétiques conventionnelles, puisqu'on le fabrique à partir du gaz naturel!

Le même problème se pose pour les cycles bactériens. Dans leur cas, on a envisagé surtout une combinaison de bactéries capables de réduire les dépôts minéraux carbonatés pour produire du gaz carbonique, avec une bactérie photosynthétique utilisant ensuite ce carbone dans la construction de chaînes organiques. La symbiose a l'avantage de réclamer moins d'additifs chimiques et moins d'éclairage, mais cela représente un écosystème encore trop fragile pour donner lieu à une production industrielle, et les besoins en engrais chimiques sont, encore là, prohibitifs.

L'avenir de ces solutions biologiques repose donc sur la recherche fondamentale: la mise au point d'espèces biologiques capables de fixer l'azote, surabondant dans l'air, en symbiose parfaite avec les micro-organismes photosynthétiques; et le perfectionnement des espèces pour en réduire la fragilité (dans le cas des cycles bactériens surtout). Il ne s'agit pas de solutions à court terme, mais il est bon de garder à l'esprit que ce domaine de la recherche pourrait nous fournir à long terme une solution définitive (ou presque) à l'épuisement de nos ressources fossiles.

Entre-temps, la culture des algues demeure fort intéressante sur le double point de vue de la fourniture d'énergie (ou d'alimentation) et de la protection de l'environnement. De nombreuses algues ont un rendement énergétique, par unité de surface, comparable aux meilleures espèces végétales (mise à part peut-être la canne à sucre), et leur croissance se fait à partir de substances qui polluent nos eaux d'égouts. Elles constituent d'ailleurs aujourd'hui le moins onéreux de nos procédés de dépollution, même pour qui n'exploite pas la biomasse produite.

b) le recours à la photochimie

Le faible rendement des procédés photochimiques naturels a rapidement incité les chercheurs à tenter de l'améliorer, non plus seulement par des techniques biologiques, mais par simple reconstitution industrielle. Plus question ici de faire appel aux organismes vivants, mais de s'en inspirer, en ne gardant de leurs propriétés que celles qui présentent un intérêt énergétique.

Ainsi, une des limitations de la photosynthèse comme source d'énergie vient de la nature des composés organiques qui stockent cette énergie solaire. La production de composés organiques plus simples, voire la simple libération de l'hydrogène, serait certes une catastrophe pour un organisme vivant, mais elle offrirait pour l'homme un meilleur rendement énergétique.

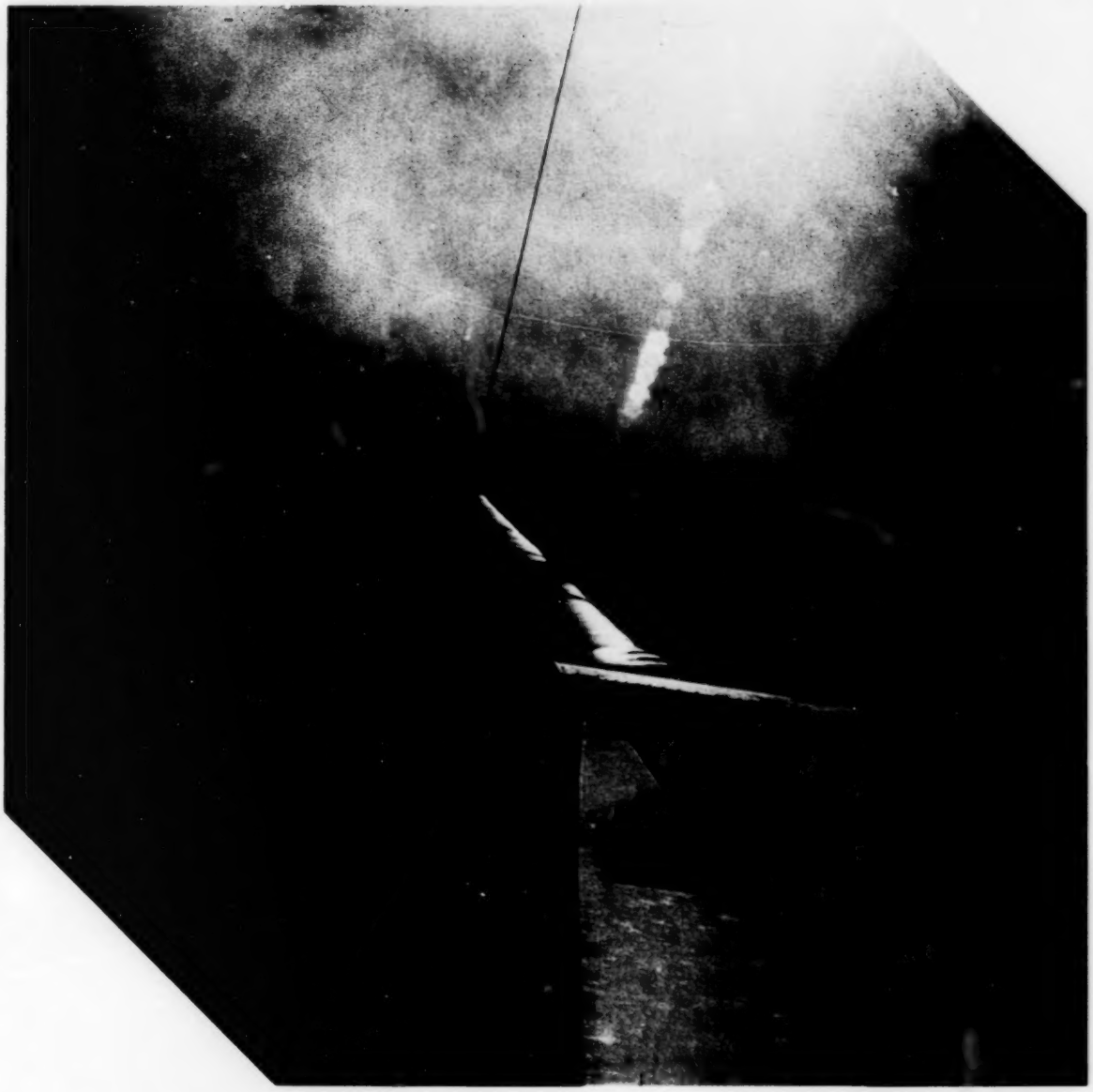
Or certaines expèces biologiques, comme l'algue bleue verte notamment, possèdent justement un enzyme capable d'effectuer cette séparation biochimique de l'eau en ses constituants, avec un rendement qui atteindrait sur ce plan 0,5 pour cent. La culture des algues, pour en extraire ce précieux enzyme et le faire travailler ensuite librement dans des cuves de photochimie industrielle, présente donc un potentiel certain.

Il en est de même de certaines autres réactions enzymatiques permettant la synthèse de méthane ou d'autres hydrocarbures simples par photochimie, réactions dont le contrôle en laboratoire offre toutefois bien peu de performance pour l'instant.

À côté de ces procédés biochimiques, de nombreuses recherches ont porté sur l'électro-photolyse de l'eau. Dans ce cas, ce sont des semi-conducteurs photosensibles qui créent des champs électriques et provoquent la séparation de la molécule d'eau. On a beaucoup étudié notamment les réactions catalysées par des photocolorants qui en augmentent considérablement le rendement, puisqu'ils permettent d'utiliser simultanément plusieurs longueurs d'ondes de la lumière visible. Malgré tout, dans ce domaine de la photochimie de combustibles, on est encore loin du seuil de rentabilité technique des procédés envisagés. La nature a quelques milliards d'années d'avance sur nous, et il faudra sans doute encore longtemps avant que nos usines photochimiques ne tiennent une place importante dans notre bilan énergétique.

Troisième partie

Les sources indirectes d'énergie solaire



Harnacher le climat

Le potentiel d'utilisation directe du rayonnement solaire, surtout pour le chauffage à basse température, ainsi que les possibilités offertes par la récupération de la biomasse non utilisée aujourd'hui, suffisent déjà à faire de l'énergie solaire un volet des plus prometteurs de notre avenir énergétique.

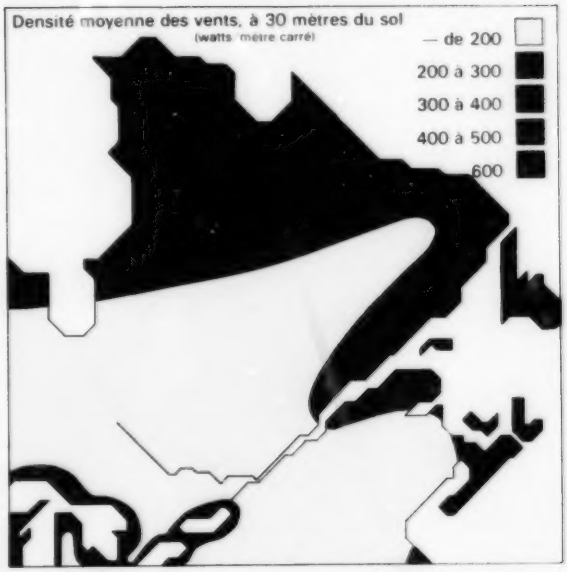
Encore qu'une analyse rigoureuse nous forcerait à ajouter aussi l'importance considérable chez nous de l'hydro-électricité, puisque, comme on l'a déjà dit, c'est dans le processus d'évaporation solaire que l'eau de nos rivières puise originellement son énergie potentielle.

Mais les modes de récupération de l'énergie solaire ne s'arrêtent pas là. Les échanges thermiques entre les masses d'air, chauffées inégalement par le soleil, à cause des différences dans la nature du sol, de l'air ou du relief, se manifestent à nous sous forme de vents parfois violents, dont l'homme a appris à se servir comme source de mouvement mécanique depuis plusieurs siècles. Ne pourrait-on pas y revenir, et raffiner encore les techniques de récupération de cette énergie?

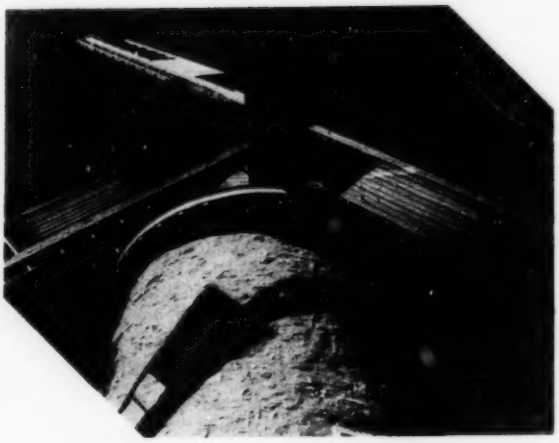
Si l'on invoque souvent avec raison l'irrégularité des vents comme obstacle à leur utilisation massive, il existe déjà un capteur «naturel» de cette énergie éolienne dont l'immense surface permet, sinon de régulariser parfaitement le débit énergétique, du moins d'en aplanir les variations. Ce collecteur gigantesque, c'est la surface des mers, où l'énergie éolienne se transforme en vagues d'envergure certes variable, mais jamais interrompues totalement.

La surface des mers fait aussi figure de capteur naturel non seulement de l'énergie du vent, mais aussi de celle liée au rayonnement solaire. La surface de l'eau est donc constamment chauffée par le soleil, ce qui crée entre elle et l'eau profonde, ou même entre l'eau et l'air libre, dans le grand nord, des différences thermiques parfois considérables. Et qui dit «différences thermiques» dit aussi «possibilités d'échanges», et donc «énergie potentielle».

C'est en somme sur ces possibilités de mise à contribution de notre climat que s'ouvre le troisième et dernier grand secteur de recouvrement de l'énergie solaire. Les espoirs sont, à priori, moins grands que du côté du rayonnement direct ou de l'énergie de la photosynthèse. Toutefois, cela ne signifie pas que, dans certains cas précis, l'on ne parvienne à des résultats importants.



Dans la majorité du territoire de la Baie James, du Nouveau-Québec, de la Côte-Nord et de la Gaspésie, la densité énergétique moyenne annuelle des vents atteint ou dépasse les 200 watts par mètre carré de section d'une éolienne. Diverses contraintes limitent toutefois le nombre d'éoliennes qu'on peut installer sur une même portion de territoire ainsi que le rendement maximum de chaque machine.



Chapitre 8

La maîtrise du vent

On connaît les possibilités de transformer l'énergie du vent en mouvement (énergie mécanique) depuis les toutes premières civilisations de la Grèce antique. Les premiers usages de ces machines éoliennes concernaient la mouture du grain puis le pompage de l'eau. Dans les deux cas, la constance du vent ne posait guère de problème considérable: l'eau pompée et la farine moulue sont stockées dans des réservoirs, pour être utilisées lorsque requises. Depuis un siècle environ, à cause du haut rendement de l'énergie mécanique produite, certaines machines éoliennes ont été couplées à des générateurs électriques, pour fournir de l'énergie d'appoint. Mais la construction de machines destinées avant tout à cette production d'électricité est un phénomène récent, sur lequel reposent encore de nombreuses incertitudes.

Quoique la densité de l'énergie éolienne soit considérable (pour tout le Bas Saint-Laurent et la Côte-Nord, ainsi que sur le territoire de la Baie James, l'énergie moyenne du vent, à 30 mètres d'altitude, atteint ou dépasse les 200 watts par mètre carré de section verticale), la présence même d'une machine éolienne produit dans l'air une traînée et perturbe l'écoulement du vent, de sorte que la surface efficace de section des pales (section frontale) ne peut guère dépasser 0,1 pour cent environ du territoire disponible, sous peine de voir chuter considérablement le rendement. Il s'ensuit donc que, malgré sa forte densité en chaque point, le volume d'énergie disponible sur un territoire donné est en moyenne au Québec 3 fois plus faible que pour la biomasse, et près de 1 000 fois plus faible que pour le rayonnement solaire libre.

En second lieu, le potentiel de récupération de l'énergie éolienne varie en fonction du cube de la vélocité du vent. Ceci signifie qu'un vent de 25 km/h produira environ deux fois plus d'énergie qu'un vent de 20 km/h, et près de 5 fois plus qu'un vent de 15 km/h. De faibles fluctuations de vent entraînent donc des variations considérables de l'énergie produite, et la nécessité de concevoir des génératrices tournant à des vitesses constantes et produisant des puissances de crête définies, gêne considérablement le potentiel de récupération total. Ainsi, on peut considérer comme virtuellement impossible d'utiliser les vents trop faibles, et les génératrices seront conçues avec une puissance maximale au-delà de laquelle on laisse tout simplement fuir l'énergie excédentaire, en jouant par exemple sur l'orientation des pales (l'angle d'attaque par rapport au vent) ou sur les caractéristiques mécaniques de l'éolienne... si ce n'est carrément par un système de freinage d'appoint. En pratique donc, cela limite à environ 15 ou 20 pour cent le rendement d'une éolienne électrogène, et diminue d'autant la puissance maximale disponible sur un territoire comme le Québec.

Le troisième obstacle tient à l'inconstance de cette forme d'énergie. Même en région généralement venteuse, il peut arriver fréquemment des périodes de grande accalmie, qui nécessitent alors de coupler le réseau d'éoliennes avec d'importantes installations de stockage. Plusieurs modes de «mise en réserve» de l'énergie sont présentement à l'étude. Mentionnons le traditionnel pompage de l'eau, qui en retournant ensuite vers sa source pourrait faire tourner une turbine électrogène. Ce mode de stockage ne pourrait toutefois se rentabiliser que dans les cas où le réservoir supérieur (réservoir de pompage) existe naturellement. On a aussi songé au stockage par air comprimé, dans le cas des Îles de la Madeleine en particulier, puisque de grandes cavités pratiquées dans les dômes de sel constitueraient un réservoir efficace et

peu coûteux pour cet air comprimé. Le stockage sous forme de chaleur, dans le cas où l'énergie produite serait ultérieurement utilisée aux fins de chauffage, est une technique plus simple à première vue, de même que l'utilisation de piles sèches constamment rechargées par les éoliennes. Dans ce dernier cas toutefois, le coût de piles de grandes dimensions est généralement considéré comme prohibitif. Enfin, on a aussi songé à une forme de stockage gravitationnel où plutôt que de pomper de l'eau, l'éolienne actionne un système de roues d'engrenage destiné à assurer la lévitation d'une masse lourde. Un peu comme dans une horloge grand-père, cette masse restitue l'énergie dans le système en redescendant progressivement vers son point d'origine.

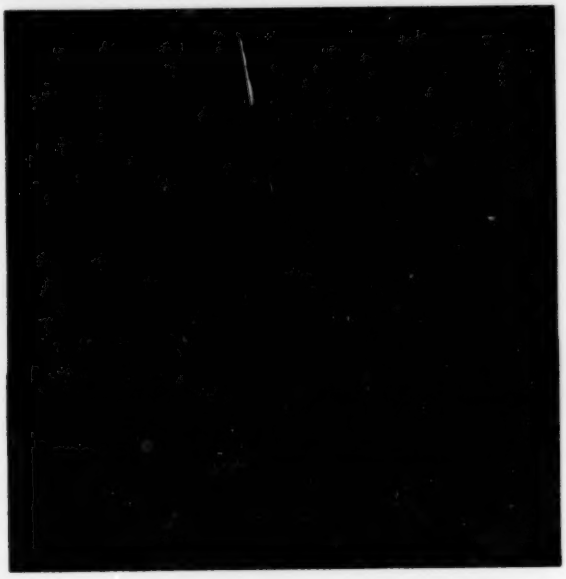
À plus long terme, l'énergie électrique pourrait être utilisée pour la fabrication d'hydrogène, dont le stockage ne poserait guère plus de problèmes que celui du gaz naturel. Cela suppose toutefois, comme on l'a mentionné dans le cas de la production d'hydrogène solaire, que l'infrastructure d'accueil de cette «économie à l'hydrogène» soit d'abord mise en place.

a) les éoliennes de faible puissance

Ces contraintes relatives à la constance du vent ont donc traditionnellement limité le champ d'application des machines à vent aux usages comportant des caractéristiques inhérentes au stockage. Ce fut le cas de la mouture du grain ou du pompage de l'eau.

Plus récemment toutefois, on a installé des éoliennes comme source d'électricité pour des stations isolées de télécommunications ou de météorologie, où la fourniture en électricité ou en combustible pour un groupe électrogène devient prohibitive. Lorsque la consommation de telles installations est faible et l'ensoleillement suffisant, le couplage de capteurs photovoltaïques avec une batterie peut être la solution la plus économique. Mais le coût de ces capteurs augmente avec la surface requise, et à partir d'une certaine consommation, l'installation d'éoliennes à faible puissance devient nettement moins chère, sous des conditions de vent normales.

Plus généralement, dans l'ensemble des postes isolés alimentés en électricité à partir de groupes électrogènes



diesels, le couplage de ces générateurs avec une ou quelques éoliennes peut se rentabiliser rapidement par les économies d'huile diesel qu'il permet. C'est d'autant plus vrai au Québec que les régions les plus exposées aux vents sont aussi, en général, des régions faiblement peuplées, où la fourniture de combustibles coûte cher. En même temps, cela limite le potentiel total de ces éoliennes commerciales dans notre bilan d'énergie.

C'est donc plutôt du côté des éoliennes de grande puissance, susceptibles de générer d'importantes économies d'échelle, que se situent, au Québec comme à travers le monde industrialisé, les principaux espoirs de mise à contribution de l'énergie du vent.

b) les éoliennes de grande puissance

La génératrice à vent la plus puissante au monde fonctionne maintenant depuis le 17 novembre 1977, dans la petite localité de Tvind, au Danemark. Grimpée sur une tour de béton de 53 mètres de haut, elle coupe de ses trois pales un cercle de 54 mètres de diamètre, pour alimenter en force motrice un générateur de 2 mégawatts. L'énergie produite est stockée sous forme de chaleur et suffira au chauffage du collège de Tvind, dont le personnel (1 000 professionnels et employés) et les étudiants (beaucoup plus nombreux) en ont entrepris seuls la construction.

Un excédent de près d'un mégawatt, par journée venteuse, sera vendu au réseau électrique local, qui fournira en échange l'électricité requise pour les besoins d'éclairage du collège, par journée calme. Comme la demande globale du réseau augmente généralement par journée venteuse à cause du rafraîchissement de la température que cela implique le plus souvent, cette forme de couplage présente des avantages pour le réseau, tout en assurant en moyenne l'indépendance énergétique du campus de Tvind.

Une telle association entre une éolienne et un réseau électrique paraît séduisante, d'autant plus que la gigantesque construction de Tvind n'a coûté que l'équivalent de 720 000$, en dollars canadiens de 1977. À titre de comparaison, la centrale nucléaire de Gentilly, au Québec, coûtera environ 1,1 milliard $, pour une production de 600 mégawatts, soit 1,8 million $ par mégawatt installé. Même en tenant compte d'un facteur de rendement aléatoire en général 2 à 3 fois plus faible avec l'énergie éolienne qu'avec l'énergie nucléaire (le vent ne souffle guère qu'un certain nombre de jours par année), l'installation de Tvind demeure 2 fois moins chère et ne coûtera plus rien en combustible.

Mais attention! Cette prouesse économique n'est pas la règle. Elle n'a été possible que parce que les étudiants et professeurs du campus ont travaillé bénévolement à cette œuvre unique. Et même en comptabilisant chichement les heures ainsi sacrifiées, le coût par mégawatt utile de Tvind rattraperait sans doute celui de notre réacteur de Gentilly. Mentionnons toutefois que, même avec toute la bonne volonté du monde, aucune équipe de bénévoles ne saurait construire une centrale nucléaire... ce qui montre au moins un avantage potentiel des énergies qu'on appelle «douces».

Cet exemple suffit à démontrer qu'avec les progrès récents de l'aérodynamique et des techniques des matériaux, la conception d'éoliennes compétitives en termes de coûts n'est guère plus un rêve irréaliste. Reste bien sûr le problème du stockage ou de la fourniture d'énergie

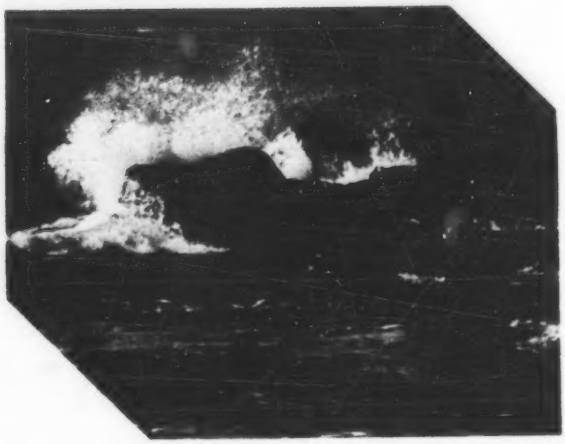
d'appoint. La communauté de Tvind peut compter sur le réseau pour lui fournir de l'énergie, en périodes sans vent. Et si une de ces périodes calmes survient par journée très froide, à l'heure de pointe de la consommation électrique, le réseau ne peut guère compter sur l'éolienne comme capacité additionnelle. En somme, si le couplage entre une éolienne et un réseau peut représenter des économies d'énergie, lorsque ce réseau repose en bonne partie sur des centrales fonctionnant au pétrole ou au charbon (ces centrales peuvent être arrêtées à volonté, lorsque le vent se lève), elle n'implique guère d'économie, sur le plan des immobilisations totales: malgré le grand potentiel du vent, la compagnie d'électricité devra être prête à fournir la même quantité d'électricité par d'autres centrales, en cas de journée calme. Pour cette raison, il faudra sans doute que le prix des combustibles fossiles augmente encore considérablement pour que le couplage éolienne-réseau représente un investissement rentable au seul chapitre des économies d'énergie.

Dans le cas du réseau québécois, une seule centrale fonctionne au pétrole, et elle est très peu utilisée (comme centrale de pointe uniquement). Toutefois, un certain nombre de centrales hydrauliques sont suréquipées en turbines, pour répondre à la demande de pointe. Ce suréquipement requiert toutefois un niveau d'eau suffisant dans les réservoirs délimités par les barrages. L'adjonction d'un certain nombre d'éoliennes de grande puissance en divers sites du réseau permettrait ainsi théoriquement de profiter des journées venteuses pour «recharger» les barrages. En outre, le couplage d'éoliennes avec notre réseau présente aussi un avantage technique: en absence de vent, les structures peuvent servir de machines tournantes fournissant au réseau l'inertie qu'il requiert (des «compensateurs synchrones», pour employer le jargon technique), afin de prévenir les déséquilibres entre des bassins de consommation très densément peuplés et des sources hydro-électriques de plus en plus éloignées.

Toutes ces raisons militent pour un développement de la recherche sur les éoliennes au Québec. L'Hydro-Québec avait érigé une première éolienne de 230 kW aux Îles de la Madeleine, mais des erreurs, qui auraient pu être évitées, ont causé le bris des pales en rotation contre ses propres haubans. Cette éolienne à axe vertical rappelant la forme d'un batteur à oeufs (éolienne Darrieus) est une innovation développée dans les laboratoires du Conseil national de recherches du Canada, qui présente pourtant des avantages certains sur les autres types d'éoliennes. Quoique de rendement théorique moindre que les modèles à axe horizontal, l'éolienne du CNRC coûte nettement moins cher (son pylône de support étant très court), et sa technologie est plus simple (pas d'angle variable des pales, moins de contraintes mécaniques sur celles-ci, possibilité d'utilisation de matériaux plus légers, couplage plus direct entre l'axe et la génératrice, etc).

Devant ces nombreux avantages, l'Institut de recherche de l'Hydro-Québec a immédiatement voulu reconstruire ce prototype de 230 kW. L'étape suivante du programme éolien de l'Hydro-Québec consistera à construire, sur la Côte-Nord, une éolienne de 100 mètres de hauteur, la plus grosse au monde, produisant 3,8 mégawatts d'électricité. Le coût est évalué à 18 millions $.

L'éolienne à axe vertical des Îles de la Madeleine, au moment des premiers essais. Ce programme d'essai et d'intégration de l'éolienne au réseau électrique des Îles est mené en collaboration avec le Conseil national de recherches du Canada, concepteur de l'éolienne.



Chapitre 9

L'énergie des océans

Au moins trois voies de récupération de l'énergie des océans sont présentement à l'étude. La première est une forme indirecte de récupération de l'énergie éolienne: c'est l'énergie des vagues. La seconde rappelle plutôt les machines thermosolaires, alors que l'eau joue simplement le rôle d'un vaste réservoir de captage et de stockage de l'énergie du rayonnement solaire. La troisième, la seule déjà en opération dans le monde, repose sur l'énergie des marées. Elle sera traitée séparément en quatrième partie parce qu'elle ne repose pas, même indirectement, sur l'énergie thermique fournie par le soleil

a) l'énergie des vagues

La surface de l'océan agit comme un gigantesque capteur de l'énergie du vent. Comme les vagues se propagent toutefois sur de très grandes distances, l'énergie récupérable en chaque point dépend peu des conditions venteuses en ce point précis, et fluctue considérablement moins que l'énergie éolienne elle-même. À condition toutefois d'aller puiser cette énergie mécanique des vagues assez loin des rives, de façon à empêcher que l'interférence des fonds marins ne leur fasse perdre l'essentiel de leur potentiel, il demeure techniquement possible de récupérer jusqu'à 10 kW par mètre linéaire de vagues harnachées tout au long des côtes atlantiques, de manière à peu près indépendante des fluctuations climatiques.

Pour y parvenir, deux configurations ont été envisagées. La première rappelle une ligne de «canards» qui flotteraient côte à côte, avec un certain angle par rapport à la vague incidente. Leurs mouvements de bascule successifs au sommet de la vague engendreraient la rotation d'un vilebrequin, relié par un système de transmission à l'axe d'une génératrice électrique. La seconde configuration est constituée d'un ensemble de cylindres verticaux, dans lesquels le niveau d'eau monte et descend constamment. C'est ce mouvement qui serait transmis à des pistons, reliés eux aussi à l'axe d'un groupe électrogène. Dans une variante de cette seconde conception, le mouvement aller-retour des pistons fait tout simplement place à une compression de l'air dans la partie supérieure des cylindres verticaux, l'air comprimé étant dirigé vers une turbine qu'il actionne directement.

Entre les planches à dessin et les premières réalisations expérimentales, des années de recherches seront nécessaires dans plusieurs domaines: problèmes de corrosion des métaux en milieu salin; problèmes de stabilité des centrales comportant des parties flottantes, même lors de grosses tempêtes; problèmes de résistance des matériaux; sans parler de la transmission vers la côte de l'énergie produite au large, etc.

Les premiers domaines d'application de cette technologie concerneront sans doute l'alimentation en énergie des plates-formes de forage en mer, souvent soumises à de dures conditions de vagues, et pour lesquelles tous les problèmes mentionnés se posent déjà d'une certaine manière. L'avenue de recherche la plus intéressante repose sur la conception de structures servant à la fois de brise-lames portuaires et de générateurs électriques utilisant cette énergie perdue. Déjà de forts investissements sont consentis au chapitre de la protection portuaire contre les vagues, de sorte que même si de telles centrales côtières donnaient une production beaucoup moins stable, leur coût initial pourrait être absorbé presque totalement par leur autre vocation de «brise-lames».

b) le gradient thermique des mers

Le principe de l'utilisation de la différence de température entre les eaux océaniques de surface, chauffées par le soleil, et les eaux froides des abysses, n'est pas neuf. Proposé en 1881 par le Français d'Arsonval, il donnait lieu à un prototype de 3,3 kW en 1930, puis à une première expérience pilote, en 1956, en Côte-d'Ivoire, produisant 3,5 MW cette fois.

Le système est simple. Dans les mers tropicales, les eaux de surface atteignent facilement 25°C, contre à peine 3° ou 4°C, 1 000 mètres plus bas. Un système de pompage peut alors amener en surface, à l'intérieur d'un tube isolé, l'eau froide des profondeurs, qui sert à condenser de l'ammoniac ou un autre fluide à basse température d'ébullition. Mis de nouveau en présence de l'eau chaude de surface, ce fluide s'évapore donc, entraînant dans son expansion le mouvement d'une turbine génératrice. Nouvelle condensation à l'eau froide, et le cycle recommence.

Si les prototypes de faible puissance mis à l'essai jusqu'à maintenant n'ont guère été compétitifs, rien n'empêcherait en principe un projet comme celui soumis par l'Université Sir John Hopkins au Department of Energy des États-Unis de le devenir: ici, un tube long de 700 à 1 000 mètres pompe jusqu'à 1 000 mètres cubes d'eau froide à la minute, pour actionner des turbines d'une puissance totale de 121 MW. Une fois soustraites les pertes mécaniques et l'énergie consommée dans les opérations de pompage et d'entretien de la centrale, c'est un bilan de 100 MW électriques nets qu'annoncent les promoteurs du projet qui devrait voir le jour avant 1990.

Malheureusement, les exigences thermiques imposent le choix d'un site en eau profonde, et le problème de l'acheminement de l'énergie produite vers les lieux de consommation se pose encore. On a retenu deux hypothèses: la production d'hydrogène, acheminé vers les [illegible] par méthaniers ou sous forme d'ammoniac liquide, ou bien l'utilisation de cette énergie sur place, dans des processus industriels comme la fabrication de l'aluminium par exemple.

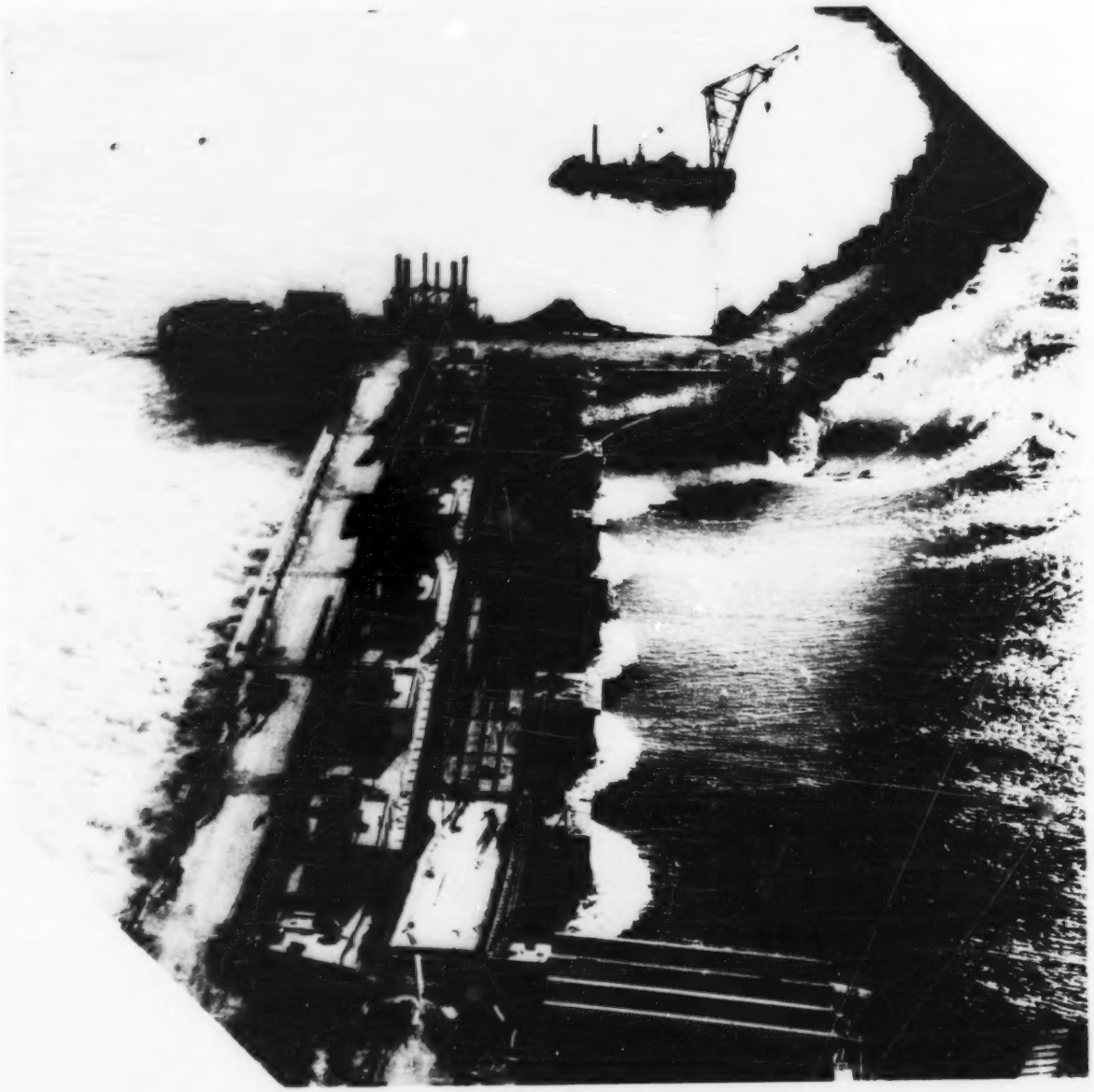
Au Québec par contre, le gradient thermique de nos océans est à priori beaucoup trop faible pour rentabiliser éventuellement une telle centrale qui ne parviendrait même pas, dans les meilleures hypothèses, à rembourser l'énergie requise pour le pompage. Par contre, une variante de ce principe peut être imaginée, utilisant encore une fois l'eau de surface comme source chaude, mais l'air ambiant comme source froide. Dans ce cas, il faudrait donc situer notre centrale au grand nord, et elle ne donnerait un rendement intéressant que par journées froides (lorsque l'air est à moins 20°C, et que l'eau reste à quelques degrés au-dessus du point de congélation). Tous les problèmes relatifs au transport de l'énergie produite, ou même à son utilisation sur place, se trouvent aggravés par l'environnement arctique, de sorte que le projet n'a reçu pour l'instant qu'une attention distraite.

Il a toutefois inspiré une variante «artificielle» de ce mode de récupération thermique. Un vaste bassin sert alors de capteur solaire. En jouant sur la salinité de l'eau, et grâce à divers catalyseurs chimiques, une différence de température suffisante peut être produite entre la surface et le fond du bassin, même pour une profondeur relativement faible (ou alors entre la température du bassin et l'air ambiant, par grands froids d'hiver). C'est en quelque sorte la reprise du principe du moteur thermosolaire dont il a déjà été question en première section. Même si les premières analyses tendent à démontrer qu'un tel «étang énergétique» aurait un intérêt certain pour de nombreux pays du Tiers-Monde, sa rentabilisation demeure incertaine chez nous à cause de deux facteurs: l'inconstance du soleil, mais surtout la neige et la glace qui auraient tendance à recouvrir continuellement la surface de l'eau, réduisant à néant son efficacité de captage, certains jours d'hiver.

Quoiqu'il ne soit pas impossible à moyen terme que ces machines thermiques soient utilisées comme génératrices électriques, dans certaines localités arctiques, l'énergie thermique des masses d'eau demeure pour l'instant une ressource sans grand potentiel chez nous.

Quatrième partie

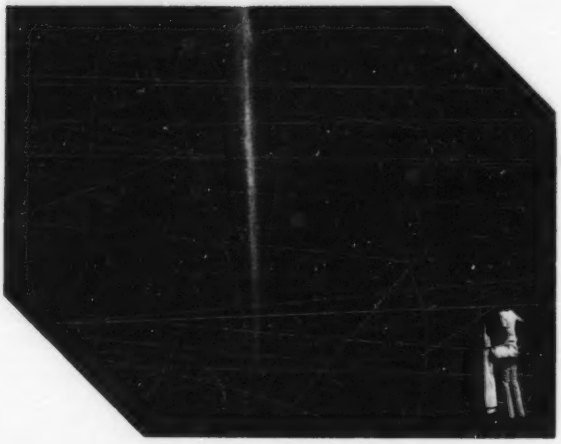
Les autres sources d'énergie inépuisable



Source d'énergie virtuellement inépuisable, le rayonnement solaire n'est pourtant pas le seul instrument du fascinant concerto énergétique terrestre. Ce n'est pas lui qui est à l'origine des tremblements de terre, des volcans ou des geysers. Et si la masse solaire joue un faible rôle dans le jeu des marées, où l'attraction de la lune compte surtout, le rayonnement lumineux, lui, n'y est pour rien. Et si ce rayonnement est à l'origine de l'évaporation des masses d'eau et de la formation des nuages, n'est-ce pas également l'attraction gravitationnelle de la terre elle-même qui, tôt ou tard, ramène cette eau à la mer, et permet le déploiement de l'énergie hydraulique?

Peut-on donc compter aussi sur ces autres sources d'énergie renouvelable, dans notre planification à long terme?

Dans le cas de l'énergie des tremblements de terre ou des glissements de terrain, le Québec apparaîtrait comme une terre privilégiée. Encore faudrait-il que cette énergie, parfaitement imprévisible jusqu'à maintenant, soit exploitable d'une certaine manière. Là, l'imagination des chercheurs n'a pas encore porté fruit. L'horizon n'est heureusement pas si vide du côté de la géothermie ou de l'énergie des marées.



Chapitre 10

Cette chaleur sous nos pieds

Il y a constamment sous nos pieds un transfert de chaleur en provenance du noyau de la terre, fait de métaux en fusion, vers ses couches superficielles. Ce flux d'énergie, qui ne dépasse guère une demie de un pour cent de la densité de l'énergie solaire reçue en moyenne sur le sol québécois, serait à toutes fins pratiques inutilisable, n'eût été la présence de quelques «cheminées» où ce transfert s'effectue beaucoup plus rapidement, et de réservoirs à grande capacité thermique qui ont accumulé depuis des millénaires l'énergie en provenance du sous-sol.

Dans le premier cas, l'exploitation directe de la chaleur dégagée par les volcans n'est pas impossible. Divers systèmes d'injection d'eau souterraine pour drainer des calories de la lave dormante ont été envisagés. Mais comme le Québec ne possède pas de tels volcans en activité, cette technologie, fût-elle perfectionnée, ne nous serait guère utile.

a) Les nappes géothermiques

La technologie actuellement utilisée pour recueillir l'énergie géothermique ne repose toutefois pas sur l'exploitation des volcans, mais sur celle des réservoirs d'eau chaude pressurisée (sources chaudes ou geysers) du sous-sol, ou sur l'énergie thermique moins fortement concentrée, accumulée dans les bassins sédimentaires. Dans un cas comme dans l'autre, il s'agit donc d'accumulation considérable d'énergie, sur de longues périodes, et en ce sens la géothermie classique n'est pas vraiment une ressource renouvelable, pas plus que les nappes pétrolières, ou les sites carbonifères.

À l'échelle canadienne pourtant, les ressources géothermiques sont considérables. Les montagnes Rocheuses comptent de nombreuses sources chaudes. Elles sont toutefois trop éloignées des centres de consommation pour avoir justifié jusqu'ici une exploitation quelconque. Par contre, le potentiel des bassins sédimentaires des Prairies est, pour sa part, considérable. Il s'agit alors de strates rocheuses emprisonnant des nappes d'eau chaude à moyenne température (entre 140 et 350°C en général), nappes qui ne pourraient guère alimenter des centrales électrothermiques, mais pourraient fournir une part importante du chauffage des locaux dans ces régions. Présentement, le développement de cette ressource est limité par les faibles densités de population et la nature même du développement immobilier. Lorsqu'un puits de chaleur coûte, grosso modo, plus de 1 million $, son forage nécessite d'abord un grand nombre d'utilisateurs potentiels, dans un petit rayon, pour amoindrir ensuite les coûts de distribution de cette énergie thermique.

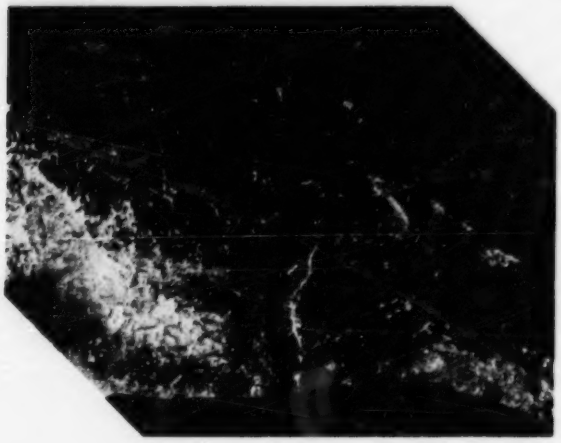
Les mêmes problèmes économiques se posent dans le cas du Québec. Mais en outre, l'exploitation de cette source de chaleur est encore moins probable, à cause de la faible étendue de nos bassins sédimentaires et de leur situation préférentielle sous les sols immergés du Saint-Laurent. Dans l'ensemble, la présence de telles nappes d'eau chaude survient dans les territoires où l'on a aussi découvert du pétrole. Quoique le potentiel du Québec ne soit pas nul à ce chapitre, les recherches n'ont encore donné que de faibles résultats, rappelons-le.

b) les pompes à chaleur

La technique des pompes à chaleur utilisant les nappes d'eau souterraines comme sources de calories est appelée à se perfectionner avec la multiplication des bassins de stockage thermique, accompagnant l'implantation progressive de l'énergie solaire. Or, il n'est pas nécessaire, en principe, de disposer d'un tel bassin chauffé pour faire fonctionner une pompe à chaleur. En hiver, si l'air extérieur est beaucoup trop froid pour que les pompes à chaleur air-air présentent de réels avantages sous nos climats, tel n'est pas le cas du sous-sol. Au-delà d'un ou deux mètres, le sol ne gèle jamais, et la température s'accroît encore, à mesure que l'on gagne en profondeur. Comme on l'a mentionné, les premières pompes de chaleur sol-air ont été conçues pour puiser ainsi leur énergie dans des nappes d'eau naturelles du sous-sol. En principe, de telles pompes peuvent offrir un excellent rendement thermique. Malheureusement, la nécessité de dessiner chaque installation en fonction des caractéristiques propres du sous-sol creusé, et le manque de connaissances sur la disponibilité des nappes d'eau souterraines ont lourdement grevé le développement commercial de ces sytèmes de chauffage.

Les nouvelles applications envisagées ont fait reprendre les recherches sur les pompes à chaleur. Au Québec, l'IREQ a expérimenté ce système de chauffage dans une maison habitée et à constaté que la pompe à chaleur couplée à la nappe d'eau disponible à cet endroit pouvait suffire à chauffer la maison sans faire usage du système de chauffage conventionnel. La Direction générale de l'énergie du Québec, pour sa part, a commandé à une entreprise de forage, une étude, par prélèvement d'échantillons, sur la disponibilité, la température et les propriétés chimiques des nappes d'eau souterraines au Québec.

La nouvelle situation créée dans ce marché par le couplage de pompes à chaleur avec les bassins de stockage de chaleur pourrait donc entraîner un perfectionnement rapide des pompes. À moyen terme, cela pourrait conduire à l'utilisation possible de l'énergie inhérente au sous-sol, c'est-à-dire ce flux «lent» d'énergie géothermique. Dans ce cas, la géothermie deviendrait virtuellement une source inépuisable d'énergie, puisqu'il ne s'agirait plus d'utiliser uniquement les nappes d'accumulation de cette chaleur.



Chapitre 11

L'asservissement des marées

Les Québécois, habitués aux gigantesques barrages hydro-électriques, ont souvent tendance à croire qu'on ne peut produire de l'électricité hydraulique que là où l'on retrouve de fortes dénivellations. On oublie souvent que la centrale de Beauharnois, d'une puissance dépassant celle de Manic 5, est pourtant construite au fil de l'eau. C'est alors l'importance considérable du débit des eaux du fleuve Saint-Laurent qui compense pour la faible dénivellation au niveau des turbines.

Regardons maintenant ce qui se passe avec les marées. Lorsque, sous l'action de l'attraction gravitationnelle de la lune, toutes les masses d'eau océaniques se déplacent d'est en ouest, puis de nouveau vers l'est, ce sont des débits d'eau nettement plus grands qui sont ainsi produits. Si dans une baie maritime refermée sur elle-même, ayant un périmètre côtier de 50 kilomètres et une surface de quelque 150 kilomètres carrés, le niveau d'eau s'accroît d'un mètre ou deux simplement, tout en reculant les rives de 5 ou 6 mètres en moyenne, ce sont plus de 225 millions de mètres cubes d'eau qui pénètrent et sortent alternativement du bassin à chaque marée, ce qui équivaut à un débit de plus de 10000 mètres cubes à la seconde.

Il suffirait alors en principe de refermer cette baie par une digue, de forcer l'eau à y pénétrer par des corridors particuliers, et de placer des turbines dans ces corridors, pour créer une centrale marémotrice. On peut n'utiliser que l'énergie de la marée montante, mais la présence même de la digue et des turbines freine l'arrivée d'eau, et diminue considérablement le potentiel de récupération. On peut au contraire laisser entrer librement l'eau dans la crique, en ouvrant les digues, et forcer le passage par les turbines lors du reflux. Ce choix donne en général une production de crête plus forte. Mais il existe aussi une autre solution, qui consiste à utiliser des turbines à double sens, ou un système de digues variables, permettant une production d'énergie à la fois lors du flux et du reflux de la marée. Ces systèmes un peu plus coûteux fournissent aussi un volume plus grand d'énergie, avec deux cycles de production chaque jour, dont la crête est en général plus faible.

Les usines marémotrices ont toutefois de graves inconvénients. Leur cycle lunaire semi-diurne n'est pas du tout ajusté sur les besoins de la consommation, de sorte que les mégawatts produits sont parfois peu utiles, alors que quelques heures plus tard, au temps mort des marées, on en aurait subitement besoin! Comme les marées ne sont intéressantes à harnacher que lorsqu'on peut emprisonner de larges bassins, les ouvrages hydrauliques de ce genre nécessitent en général des kilomètres de digues, érigées en milieu marin, pour une production qui n'a finalement pas la stabilité d'un ouvrage analogue dans le cas d'une rivière. Il s'ensuit un coût nettement plus élevé de l'énergie produite. Enfin, l'érection de telles digues modifie considérablement l'environnement maritime, perturbe la vie aquatique (en provoquant entre autres l'ensablement des fonds rocheux), et modifie à court et à long terme le régime des courants et des marées, rendant même incertain le caractère inépuisable de cette énergie. énergie.

Il n'existe présentement qu'une seule usine marémotrice de taille commerciale, dans le bassin de la Rance, en Bretagne française. Les marées y étant très fortes, le gouvernement français y a évalué de nombreux autres sites potentiels, mais les facteurs économiques et écologiques ont conduit à l'abandon de tous les projets.

Le Canada jouit par contre du site le plus intéressant au monde pour ce genre d'ouvrage: la Baie de Fundy. Véritable entonnoir marin, cette Baie se termine par deux langues de mer plutôt étroites, s'ouvrant à leur tour sur plusieurs bassins. Selon l'envergure qu'on voudrait donner à la centrale, de nombreux sites sont aménageables, à l'intérieur d'une région assez restreinte. Un projet est présentement sérieusement à l'étude, dans le Bassin de Cumberland, au coût de plus de 3 milliards $, pour une production moyenne de 1 000 mégawatts. Pour la même production nominale, l'énergie de la Baie James aura coûté au Québec près de 2 fois moins, et sa disponibilité est totale, alors qu'elle ne dure qu'environ 8 heures par jour dans le projet «à sens unique» envisagé au Bassin de Cumberland.

Les côtes de Terre-Neuve et du Labrador regorgent aussi pour leur part de sites potentiellement exploitables. Mais au Québec (comme dans le reste du Canada d'ailleurs) le seul autre site intéressant est la Baie d'Ungava, dont les nombreuses criques pourraient en principe produire jusqu'à 10000 MW. Mais compte tenu du fait que les marées y sont moins fortes que dans la Baie de Fundy, que les coûts de construction dans l'Arctique québécois sont nettement plus élevés, et qu'il faudrait en outre acheminer l'énergie produite vers les régions peuplées du sud, le potentiel des marées de l'Ungava demeurera sans doute inexploitable pour quelques générations encore.

Notons enfin, avant de fermer ce chapitre sur l'énergie des mers, que des auteurs ont déjà envisagé la possibilité de tirer de l'énergie des forts courants marins. Le projet est né surtout face aux forts courants de la mer du Nord et de la Manche, puis à moindre titre ceux du Gulf Stream océanique. La côte est du Québec et du Labrador possède aussi un courant assez fort, mais aucune technologie efficace n'a encore été proposée pour effectuer cette récupération d'énergie. L'horizon est donc encore plus lointain!

Conclusion

... Beaucoup plus qu'une question de folklore

Dans le débat qui s'est ouvert, depuis quelques années, sur les énergies nouvelles, on a parfois l'impression que le retour au bois ou la multiplication des capteurs solaires et des moulins à vent ne sont que des visions poétiques ou passéistes, dont l'avenir pourrait sembler limité, dans notre bilan énergétique.

Sur ce plan, les statistiques sont déjà trompeuses. Le bois est, aujourd'hui même, largement utilisé par les sociétés forestières pour produire leur vapeur industrielle, mais il n'est pas comptabilisé dans notre bilan énergétique, parce qu'il ne fait l'objet d'aucune transaction entre fournisseur et utilisateur. De même, il sera toujours difficile de comptabiliser l'apport des capteurs solaires (comment évaluer l'énergie qu'aurait requise une résidence, si elle avait été chauffée par un autre système), en particulier dans le cas des systèmes passifs, à la limite des simples mesures de conservation d'énergie.

Ce qui est sûr, c'est que les horizons ne sont pas toujours aussi lointains qu'on l'imagine. L'utilisation des résidus ligneux pour la production de chaleur, ou même indirectement pour la production d'électricité, est déjà compétitive. Il en est de même pour l'exploitation commerciale des gisements de tourbe.

L'utilisation de l'énergie solaire pour le chauffage des locaux n'a pas encore franchi le seuil de la rentabilité. Mais avec les efforts considérables annoncés par les gouvernements dans le domaine de la recherche et de l'implantation industrielle du chauffage solaire, cette rentabilité ne tardera pas. Certaines innovations récentes, comme les capteurs à vide et les pompes à chaleur eau-air, pourraient bien assurer dès maintenant l'indépendance énergétique totale d'une maison parfaitement isolée, sans nécessiter de stockage saisonnier trop coûteux.

Les autres développements envisagés dans le cas de la biomasse nécessitent une certaine infrastructure industrielle, et n'auront donc qu'une part marginale dans notre programme énergétique des prochaines décennies, période d'expérimentation d'abord, puis d'implantation progressive des usines. Il a bien fallu 25 à 30 ans pour que l'atome tienne une place quelconque dans le tableau énergétique des pays occidentaux, et près d'une vingtaine d'années ont séparé la préparation des premiers devis de l'usine pilote de la Great Canadian Oil Sands de la première véritable exploitation commerciale des sables bitumineux de l'Athabasca, par le groupe Syncrude. Mais le potentiel de ces technologies (production de méthanol de bois, pyrolyse des déchets et gazéification du bois ou de la tourbe, et à plus long terme la fermentation des résidus agricoles hydrolysés) est considérable, et les données techniques assez bien connues en général (ce qui n'était pas le cas de l'atome en 1945, ou de l'extraction du pétrole des sables au début des années 1960). Voilà pourquoi ces procédés pourraient bien, dès la fin du siècle, compenser pour la raréfaction du pétrole. Pour l'instant, nous n'en sommes qu'à la phase des avant-projets d'usines-pilotes. Il faudra attendre leur mise en marche, dans les 5 ou 10 prochaines années, pour en mesurer l'impact réel.

L'implantation de l'énergie éolienne sera plus restreinte. On a mentionné toutefois les avantages, pour un réseau aussi étendu que le nôtre, de s'adjoindre éventuellement quelques machines à vent. Là encore, cela suffit à justifier que l'on entreprenne dès aujourd'hui les premiers développements.

Ressource	Technologie de conversion	Énergie produite
Soleil	Capteurs	Chaleur (<100°C)
	Pompes (moteurs) solaires	Travail mécanique Électricité
	Fours solaires	Électricité
	Photovoltaïque	Électricité
	Capteur en orbite	Électricité
Biomasse	Combustion directe	Chaleur, vapeur Électricité
	Pyrolyse et gazéification	Gaz de grade faible Gaz de grade élevé Alcool de bois (méthanol)
	Hydrolyse-fermentation	Alcool éthylique (éthanol)
	Hydrogénation	Combustible liquide
	Digestion	Méthane (gaz)
	Arbres à pétrole	Hydrocarbones lourds (sève combustible)
Vent	Petites éoliennes	Chaleur, travail mécanique, électricité
	Grandes éoliennes	Électricité
Océans	Centrale marémotrice	Électricité
	Énergie des vagues	Électricité
	Énergie des courants	Électricité
	Gradient thermique	Électricité
Géothermie	Sources thermales	Chaleur, électricité
	Bassins sédimentaires (pompage de l'eau)	Chaleur (90° à 250°)
	Pompes à chaleur	Chaleur (<100°C)

En somme, si la «révolution énergétique» n'est ni brusque ni immédiate, c'est maintenant qu'elle se joue. De nombreuses équipes universitaires ou industrielles, une foule de petites entreprises, en plus du gouvernement, ont déjà entrepris de domestiquer les énergies renouvelables négligées jusqu'ici. Les progrès paraissent modestes. Pourtant le texte que vous venez de lire n'aurait guère pu être écrit il y a 10 ans. Les progrès sont fascinants.

À l'époque où le charbon était le roi, le pétrole était recueilli «à la guenille», dans les endroits où il suintait naturellement de la pierre, pour être vendu à l'industrie pharmaceutique. 50 ans plus tard, il avait détrôné le charbon dans la majorité des pays industrialisés. Alors pourquoi cette énergie que l'on recueille aujourd'hui «à la cuiller» ne prendrait-elle pas la première place demain? L'histoire des 200 dernières années nous apprend que la dynamique de l'énergie fonctionne un peu de la sorte: chaque ressource y prend la place... puis se la fait prendre. Il suffit sans doute d'un peu de planification pour ne pas être les derniers en liste, dans le banquet énergétique de demain.

Estimé du coût (approximatif) $/Gigajoule	Estimé du délai (compétitivité)	Commentaires additionnels
8$ à 15$	1982-1987	Déjà compétitif pour certains usages. Problèmes d'application largement institutionnels
50$ et plus	? (sites très isolés)	Demande un soleil abondant. Sans grand potentiel au Québec.
30$ et plus	2020 ?	
275$	1990 ?	
Impossible à évaluer	(jamais ?)	
1$ à 2$	Maintenant (pour les résidus organiques et ligneux)	Déjà près de 4,5 pour cent du bilan québécois
4$		
3$	1980	Utilisation sur place uniquement
4$ à 5$	1983-1988	Selon le marché futur du gaz naturel
7$ à 12$	1987	
8$ à 10$	1990 ? (canne à sucre) 2000 et plus (cellulose)	Substitut pétrolier. Peut avoir son importance pour alléger la balance des paiements
?	1990 ?	Technologie trop nouvelle
Dépend des autres aspects du procédé: dépollution, production d'engrais, etc.		Potentiel très limité
6$ à 12$	1990	Espèces non disponibles au Québec
20$ à 50$ et plus	(sites isolés)	Lorsque l'inconstance du vent n'est pas un problème
14$	1990	Présente certains avantages, lorsque couplée à un réseau électrique
30$ à 40$	2020 ?	Production cyclique gênante construction arctique difficile (Ungava)
?	?	Technologies de laboratoires
?	?	
75$ et plus	2020 (mers tropicales)	Progrès technologiques à prévoir Potentiel difficile à évaluer dans le cas de l'Arctique
$10 et plus	Selon la proximité des sources	Pas de potentiel au Québec
?	?	Faible potentiel au Québec
8$ à 10$	1985	Potentiel beaucoup plus grand si la pompe est couplée avec un bassin de stockage solaire

L'information sur les énergies nouvelles, qu'on appelle aussi redécouvertes, devient de plus en plus nécessaire au fur et à mesure que se développe la prise de conscience par le public de la dépendance du monde industrialisé à l'égard du pétrole importé.

Le Québec jouit d'une situation privilégiée pour la production d'hydro-électricité et le programme de mise en valeur de cette ressource est bien connu. Cette disponibilité d'énergie électrique est un atout majeur, mais nous pouvons faire davantage. Le Gouvernement du Québec a mis sur pied des programmes d'économie d'énergie qui déjà commencent à produire leurs effets; et nous continuons à faire la promotion des énergies nouvelles tels le soleil, le vent, la biomasse, etc., lesquelles sources d'énergie sont proprement québécoises et renouvelables.

Ce document présente un panorama assez complet du domaine des énergies nouvelles et fait le point sur l'état des connaissances. Il est à souhaiter que chacun de nous y trouve une information et une philosophie utiles pour l'avenir du Québec.

ERI-6460-10
1979 — 80.61

Publié par la Direction des communications
du ministère de l'Énergie et des Ressources
1050, rue Saint-Augustin, Québec

Imprimé au Québec, Canada